

RESUM

Les propietats mecàniques dels acers per a eines i motlles, destinats a les aplicacions industrials més exigents en els sector de construcció, depenen en gran mesura del tractament tèrmic aplicat. El tremp és un d'aquests tractaments tèrmics, el qual es basa en el refredament ràpid de l'acer des d'una temperatura elevada fins a temperatures baixes, dotant al material de les característiques òptimes per a la seva aplicació final. Un dels factors més importants és el medi de refredament emprat, degut a que la transmissió de calor entre l'acer i el medi de tremp canvia d'un fluid a un altre.

En el present estudi s'investiga experimentalment el procés de refredament del tremp per a tres aleacions de diferent composició química. En particular, s'estudia la influència dels medis de refredament (oli i aigua amb sal) i la seva temperatura inicial de bany (20 i 80°C).

Per dur a terme l'estudi, s'han realitzat dos tipus d'experiments: (a) experiments seguint les indicacions, en la mesura de lo possible, de la normativa ISO9950, en els quals s'assagen provetes cilíndriques de dimensions reduïdes. I, (b) experiments amb blocs d'acer amb el tamany, i geometria, més típic de l'empresa Rovalma S.A. En aquesta segona experimentació es registra l'evolució tèrmica per a diferents punts estratègics del bloc (superfície, punt intermig i nucli).

Els resultats obtinguts mostren com l'aigua salada es presenta com el medi de refredament més energètic, i que proporciona una extracció de calor més ràpida i severa en comparació amb l'oli. No obstant, l'oli a una temperatura de 80°C és el medi de refredament més òptim per al tremp dels blocs amb geometria més complexa.

L'evolució de la temperatura de les provetes cilíndriques amb el temps, s'ha emprat per deduir analíticament el coeficient de convecció entre la proveta i el bany, mitjançant el mètode de la resistència interna negligible. Aquests coeficients experimentals s'han comparat amb els de la literatura mostrant gran disparitat de resultats en aquelles fases de refredament en la que es dona canvi de fase.

D'altra banda, aquests coeficients de convecció experimentals s'han emprat en la predicció de l'evolució de les temperatures superficials dels blocs dels experiments (b), mostrant una desviació amb els resultats experimentals.

Per tant, el projecte ha aconseguit definir un procediment experimental per tal d'avaluar els coeficients de convecció de cada bany i condicions. A més a més, de les diferències entre la predicció i els resultats experimentals podem concloure que l'efecte que la geometria té sobre el coeficient de convecció és prou gran com per invalidar els valors dels coeficients de transferència de calor dels primers experiments. Conseqüentment, cal realitzar experiments amb condicions de tremp similars, com ara, geometria, bany, temperatura i agitació.

Finalment, el projecte inclou també un pressupost econòmic per a la realització dels assajos, així com un anàlisi de l'impacte ambiental enfocat en la reutilització dels olis de tremp.

SUMARI

RESUM.....	1
SUMARI	4
ÍNDEX DE FIGURES	6
ÍNDEX DE TAULES	9
1. ORIGEN DEL PROJECTE	10
2. INTRODUCCIÓ	11
3. OBJECTIUS.....	15
3.1. Objectiu general	15
3.2. Objectius específics	15
4. ABAST DEL PROJECTE	16
5. ANTECEDENTS TEÒRICS.....	18
5.1. Fases metal·lúrgiques de l'acer	18
5.1.1. Estructura Martensítica	21
5.1.2. Estructura Bainítica	22
5.2. Tipus de convecció tèrmica en el bany	24
5.2.1. Ebullició de pel·lícula	26
5.2.2. Ebullició nucleada.....	28
5.2.3. Etapa de convecció.....	28
5.2.4. Correlacions per a les etapes de refredament.....	29
5.3. Anàlisi de les corbes de refredament	35
5.3.1. Diagrames de transformació	35
5.3.2. Medis de refredament per al tremp.....	39
5.3.3. Interpretació de les corbes de refredament.....	41
5.4. Influència dels paràmetres de tremp	44
5.4.1. Tipus de medi	44
5.4.2. Temperatura del medi de tremp	47
5.4.3. Agitació.....	47
5.5. Evolució tèrmica de l'acer	47
5.5.1. Mètode de la resistència interna despreciable.....	48
5.5.2. Validesa del mètode de la resistència interna despreciable.....	50
5.5.3. Càlcul del coeficient de transferència de calor	51
5.5.4. Efectes multidimensionals.....	52

6. PROCEDIMENT EXPERIMENTAL	54
6.1. Introducció	54
6.2. Abast del procediment experimental	55
6.3. Primera part – Assajos segons normativa ISO	55
6.3.1. Material	55
6.3.2. Determinació de les propietats físiques del material	59
6.3.3. Procediment d'assaig	66
6.4. Segona part – Cas d'estudi per al Material A	67
7. RESULTATS EXPERIMENTALS I DISCUSSIÓ	70
7.1. Caracterització dels banys	70
7.1.1. Resultats experimentals	70
7.1.2. Efecte de la temperatura del bany en el tremp	90
7.1.3. Comparació entre els diferents banys i condicions	96
7.1.4. Comparativa amb les correlacions de la literatura	99
7.2. Cas d'estudi material A	102
7.2.1. Resultats experimentals	103
7.2.2. Comparativa entre els diferents banys	119
7.2.3. Predicció de les corbes de refredament	120
8. COST ECONÒMIC DE L'EXPERIMENTACIÓ	126
9. IMPACTE AMBIENTAL – Recuperació i reutilització dels olis de tremp	128
10. CONCLUSIONS I ACCIONS FUTURES	130
10.1. Conclusions	130
10.2. Suggeriments per un futur treball	132
11. AGRAÏMENTS	133
12. BIBLIOGRAFIA	134

ÍNDEX DE FIGURES

Figura 2-1 Diagrama de transformació amb diferents velocitats de refredament (V_1 , V_2 i V_3) i estructures que s'obtenen amb cada una d'elles.	12
Figura 5-1 Diagrama de fases per als acers	18
Figura 5-2 a) Estructura BCC de la fase ferrita- α ; b) Micrografia de la ferrita	19
Figura 5-3 a) Estructura FCC de la fase austenita b) Micrografia de la austenita	19
Figura 5-4 a) Estructura ortoròmbica complexa de la cementita b) Micrografia de la cementita visualitzat a alta magnificació amb un SEM (Scanning Electron Microscope)	20
Figura 5-5 a) Estructura de la martensita b) Micrografia de la martensita.....	21
Figura 5-6 Micrografia de la bainita	22
Figura 5-7 Representació de les tres etapes de refredament en el tremp en un líquid.....	24
Figura 5-8 Corba de refredament i corba de velocitat de refredament en el centre d'una proveta de diàmetre 25mm trempada en aigua a 95°C amb l'aigua fluïnt a 0,25m/s	25
Figura 5-9 Corba d'ebullició típica per a l'aigua a 1 atm: flux de calor de la superfície q''_s com a funció de l'excés de temperatura ΔT_e	26
Figura 5-10 Velocitat de refredament per a una proveta d'Inconel de diàmetre 24 mm i longitud 72 mm, trempada en aigua entre les temperatures de 300 i 800°C fins a 100°C	27
Figura 5-11 Transformació de fase per a un acer a una isoterma d'assaig	36
Figura 5-12 Diagrama TTT per a un acer convencional.....	37
Figura 5-13 Diagrama CCT per a un acer convencional.....	38
Figura 5-14 Corbes de refredament per a diferents medis	39
Figura 5-15 a) Representació general de la corba de refredament per a tremp en un líquid b) Representació general de la velocitat de refredament per a tremp en un líquid.....	42
Figura 5-16 Diagrama de transformació i corbes de refredament per a l'acer 8630. A la representació s'indica la transformació de l'austenita en altres constituents en funció de la velocitat de refredament.....	43
Figura 5-17 Paràmetres crítics per a la corba de refredament en un tremp	44
Figura 5-18 Diagrama de fases per a la salmorra que representa la temperatura de fusió en funció de les proporcions de sal-aigua	46
Figura 5-19 Refredament, per tremp en un líquid, d'una peça d'acer calent	48
Figura 6-1 Recipient d'assaig amb mostra d'oli	56
Figura 6-2 Proveta i suport amb el termoparell en el centre geomètric de la proveta	56
Figura 6-3 Plànol de la proveta a assajar	57
Figura 6-4 Proveta a assajar per als materials A, B i C.....	57
Figura 6-5 Proveta enroscada al suport dins del forn.....	58
Figura 6-6 Datalogger DATAQ DI-718-ES en connexió amb l'ordinador.....	59
Figura 6-7 Evolució general de la conductivitat tèrmica d'un acer en front de la temperatura ..	61
Figura 6-8 Evolució de la conductivitat tèrmica en front de la temperatura per als materials d'estudi	62
Figura 6-9 Evolució de la capacitat calorífica per a l'acer 4140 i acer inoxidable 304.....	63
Figura 6-10 Evolució de la capacitat calorífica en front de la temperatura per als materials d'estudi	64
Figura 6-11 Evolució de la difusivitat tèrmica en front de la temperatura per als materials d'estudi	65

Figura 6-12 Proveta ISO amb el termoparell assajada	67
Figura 6-13 Blocs material A mecanitzats per al cas d'estudi	68
Figura 6-14 Termoparells ubicats en les seves respectives posicions en el bloc d'assaig	68
Figura 7-1 Corbes de refredament pels materials A, B i C trempats en oli a 80°C	71
Figura 7-2 Corbes de velocitat de refredament pels materials A, B i C trempats en oli a 80°C...71	71
Figura 7-3 Coeficient de transferència de calor pels materials A, B i C trempats en oli a 80°C...73	73
Figura 7-4 Corbes de refredament pels materials A, B i C trempats en oli a temperatura ambient.....77	77
Figura 7-5 Corbes de velocitat de refredament pels materials A, B i C trempats en oli a temperatura ambient.....77	77
Figura 7-6 Coeficient de transferència de calor pels materials A, B i C trempats en oli a temperatura ambient.....78	78
Figura 7-7 Corbes de refredament pels materials A, B i C trempats en aigua amb sal a 80°C....81	81
Figura 7-8 Corbes de velocitat de refredament pels materials A, B i C trempats en aigua amb sal a 80°C.....81	81
Figura 7-9 Coeficient de transferència de calor pels materials A, B i C trempats en aigua amb sal a 80°C.....82	82
Figura 7-10 Evolució temporal del coeficient de transferència de calor pels materials A, B i C trempats en aigua amb sal a 80°C	84
Figura 7-11 Corbes de refredament pels materials A, B i C trempats en aigua amb sal a temperatura ambient.....86	86
Figura 7-12 Corbes de velocitat de refredament pels materials A, B i C trempats en aigua amb sal a temperatura ambient	86
Figura 7-13 Coeficient de transferència de calor pels materials A, B i C trempats en aigua amb sal a temperatura ambient	87
Figura 7-14 Evolució temporal del coeficient de transferència de calor pels materials A, B i C trempats en aigua amb sal a 25°C	89
Figura 7-15 Corbes de refredament pel material A trempat en oli a 20 i 80°C.....91	91
Figura 7-16 Corbes de velocitat de refredament pel material A trempat en oli a 20 i 80°C	91
Figura 7-17 Coeficient de transferència de calor pel material A trempat en oli a 20 i 80°C	93
Figura 7-18 Corbes de refredament pel material A trempat en aigua amb sal a 20 i 80°C	94
Figura 7-19 Corbes de velocitat de refredament pel material A trempat en aigua amb sal a 20 i 80°C.....95	95
Figura 7-20 Coeficient de transferència de calor pel material A trempat en aigua amb sal a 20 i 80°C.....96	96
Figura 7-21 Corbes de refredament pel material A trempat en oli i aigua amb sal a 20 i 80°C..97	97
Figura 7-22 Corbes de velocitat de refredament pel material A trempat en oli i aigua amb sal a 20 i 80°C	97
Figura 7-23 Coeficient de transferència de calor pel material A trempat en oli i aigua amb sal a 20 i 80°C	98
Figura 7-24 Corbes de refredament en la superfície, punt intermig i nucli pel material A trempat en oli a 80°C	103
Figura 7-25 Corbes de velocitat de refredament en la superfície, punt intermig i nucli pel material A trempat en oli a 80°C.....104	104

Figura 7-26 Diagrama TTT amb les corbes de refredament superposades per a la superfície, punt intermig i nucli del material A trempat en oli a 80°C	106
Figura 7-27 Corbes de refredament en la superfície, punt intermig i nucli pel material A trempat en oli a temperatura ambient	108
Figura 7-28 Corbes de velocitat de refredament en la superfície, punt intermig i nucli pel material A trempat en oli a temperatura ambient	108
Figura 7-29 Comparació de les corbes de refredament en la superfície, punt intermig i nucli pel material A trempat en oli a temperatura ambient i 80°C	109
Figura 7-30 Tanc amb agitador instal·lat per dur a terme els assajos en aigua salada	111
Figura 7-31 Corbes de refredament en la superfície, punt intermig i nucli pel material A trempat en aigua salada a 80°C	112
Figura 7-32 Corbes de velocitat de refredament en la superfície, punt intermig i nucli pel material A trempat en aigua salada a 80°C	112
Figura 7-33 Diagrama TTT amb les corbes de refredament superposades per a la superfície, punt intermig i nucli del material A trempat en aigua salada a 80°C	114
Figura 7-34 Esquerda produïda sobre un dels punts crítics quan s'ha trempat en aigua salada a 80°C	115
Figura 7-35 Corbes de refredament en la superfície, punt intermig i nucli pel material A trempat en aigua salada a temperatura ambient	116
Figura 7-36 Corbes de velocitat de refredament en la superfície, punt intermig i nucli pel material A trempat en aigua salada a temperatura ambient	116
Figura 7-37 Diagrama TTT amb les corbes de refredament superposades per a la superfície, punt intermig i nucli del material A trempat en aigua salada a temperatura ambient	117
Figura 7-38 Esquerda produïda sobre un dels punts crítics quan s'ha trempat en aigua salada a temperatura ambient	118
Figura 7-39 Imatge del programa de càlcul Microsoft Excel on s'especifiquen els paràmetres d'assaig en el bloc i el medi	121
Figura 7-40 Imatge del programa de càlcul Microsoft Excel on es realitza el càlcul mitjançant les expressions analítiques.	121
Figura 7-41 Imatge del programa de càlcul Microsoft Excel on es retorna la nova temperatura del punt de la peça amb les condicions imposades.	122
Figura 7-42 Comparació entre la corba de refredament experimental i la predicció per a la superfície en el tremp en aigua salada a temperatura ambient	122
Figura 7-43 Comparació entre la corba de refredament experimental i la predicció per a la superfície en el tremp en aigua salada a 80°C	123
Figura 7-44 Comparació entre la corba de refredament experimental i la predicció per a la superfície en el tremp en oli a temperatura ambient	123
Figura 7-45 Comparació entre la corba de refredament experimental i la predicció per a la superfície en el tremp en oli a 80°C	124

ÍNDIX DE TAULES

Taula 5-1 Fases metal·lúrgiques importants per als acers	23
Taula 6-1 Equacions i coeficients de determinació per a les corbes de conductivitats pels materials A, B i C	62
Taula 6-2 Equacions i coeficients de determinació per a les corbes de calor específica pels materials A, B i C	64
Taula 7-1 Resultats dels paràmetres més comuns que caracteritzen el procés de tremp en oli a 80°C per als diferents acers	74
Taula 7-2 Resultats dels paràmetres més comuns que caracteritzen el procés de tremp en oli a temperatura ambient.....	78
Taula 7-3 Resultats dels paràmetres més comuns que caracteritzen el procés de tremp en aigua amb sal a 80°C	82
Taula 7-4 Resultats dels paràmetres més comuns que caracteritzen el procés de tremp en aigua amb sal a temperatura ambient	87
Taula 7-5 Comparativa entre el coeficients de convecció teòrics i experimentals per a l'oli a diferents temperatures	100
Taula 7-6 Comparativa entre el coeficients de convecció teòrics i experimentals per a l'aigua amb sal a diferents temperatures	100
Taula 7-7 Recull dels paràmetres més comuns que caracteritzen el procés de tremp pels diferents medis de tremp i condicions	119
Taula 7-8 Recull de les dureses obtingudes per a cada assaig en el material A	119
Taula 8-1 Pressupost econòmic per l'experimentació amb provetes ISO	126
Taula 8-2 Pressupost econòmic per a l'experimentació amb els blocs de material A.....	127

1. ORIGEN DEL PROJECTE

L'empresa Rovalma S.A., situada a la població de Rubí (Barcelona), treballa en el sector industrial dels materials. Actualment són líders tecnològics en el disseny i desenvolupament d'Acers d'Alt Rendiment i altres Aleacions Especials per a les aplicacions industrials més exigents en els sectors de construcció d'eines i motlles, com també de components per a maquinària i equips de producció.

La necessitat de la creació d'una base de dades, a on es recull el comportament tèrmic de distintes aleacions en front de diferents medis de tremp, va plantejar, arrel de la vinculació de l'autor del projecte amb l'empresa, l'elaboració del present estudi.

Finalment, també va ser necessari establir una metodologia experimental (adaptada a l'empresa) de la normativa ISO9950, per a caracteritzar la corba de refredament i velocitat de refredament de futures aleacions. Cal esmentar, que gràcies al registrament d'aquestes corbes és possible determinar el coeficient de convecció experimental per a cadascun dels materials i fluids.

2. INTRODUCCIÓ

L'acer és un material metàl·lic format bàsicament per un aliatge de ferro i una quantitat de carboni que no supera el 2,1% en pes total de ferro i carboni. Altres elements d'aliatge es poden incloure desenvolupant, segons la quantitat afegida de carboni, acers poc aleats o acers altament aleats. Els acers que s'estudien en el present projecte, els acers per a eines, formen part dels acers altament aleats.

La característica més destacada dels acers, que fan d'ells uns materials d'enginyeria amb molt d'èxit i utilitat, és la seva habilitat per ajustar les seves propietats mecàniques mitjançant un ampli interval de tractaments tèrmics controlats [1].

“El tractament tèrmic es pot definir com una operació o combinació d'operacions que implica un escalfament i refredament controlat d'un metall en estat sòlid amb la finalitat d'obtenir unes propietats específiques”.

El tremp és un procés tèrmic en el qual l'acer es refreda molt ràpidament des d'una temperatura elevada fins a temperatures inferiors a 300°C [8]. Avui en dia és considerat un dels tractaments tèrmics més importants, ja que pot millorar les propietats mecàniques de l'acer considerablement.

L'objectiu principal del tremp en els acers per a eines és aconseguir de manera satisfactòria una bona duresa. Com a conseqüència, tal com veurem més endavant, la microestructura de més interès és la martensita, la qual és el constituent més dur dels acers. Si la microestructura no és completament martensítica la duresa disminuirà [1].

No obstant, un efecte secundari important del tremp és la formació de tensions tèrmiques i transformacionals que causen canvis en la mida i forma, i poden portar a produir esquerdes en el material [2]. Per tant, el repte que presenta el tremp a l'hora d'aconseguir unes determinades propietats mecàniques consisteix en seleccionar aquell medi de refredament i procés que minimitzi les diferents tensions que es generen, i, com a conseqüència, redueixi les possibles esquerdes que es poden arribar a produir.

L'estructura termodinàmica més favorable de l'acer, en quant a homogeneïtat de les propietats assolides, es produeix quan l'acer s'escalfa a la temperatura austenítica i es refreda lentament. Aquest tractament tèrmic produeix una estructura que té un baix nivell de tensions residuals dins de l'acer. No obstant, un acer amb alta resistència s'aconsegueix en general amb refredaments ràpids per a formar una estructura martensítica o bainítica. És a dir, les propietats físiques obtingudes estan directament relacionades amb les velocitats de refredament aportades [3].

En general, la optimització del procés de refredament o tremp requereix la selecció de velocitats de refredament suficientment ràpides per a formar la desitjada microestructura martensítica, però a l'hora suficientment lentes per a minimitzar les tensions residuals i distorsió. A la Figura 2.1 es mostren tres processos de tremp amb diferents velocitats de refredament (V_1 , V_2 , V_3) i la corresponent transformació estructural que s'aconsegueix. Per aconseguir una estructura martensítica completa caldria aconseguir una velocitat de refredament V_1 , ja que la resta de velocitats ens proporcionen una barreja de martensita i altres estructures que no interessa.

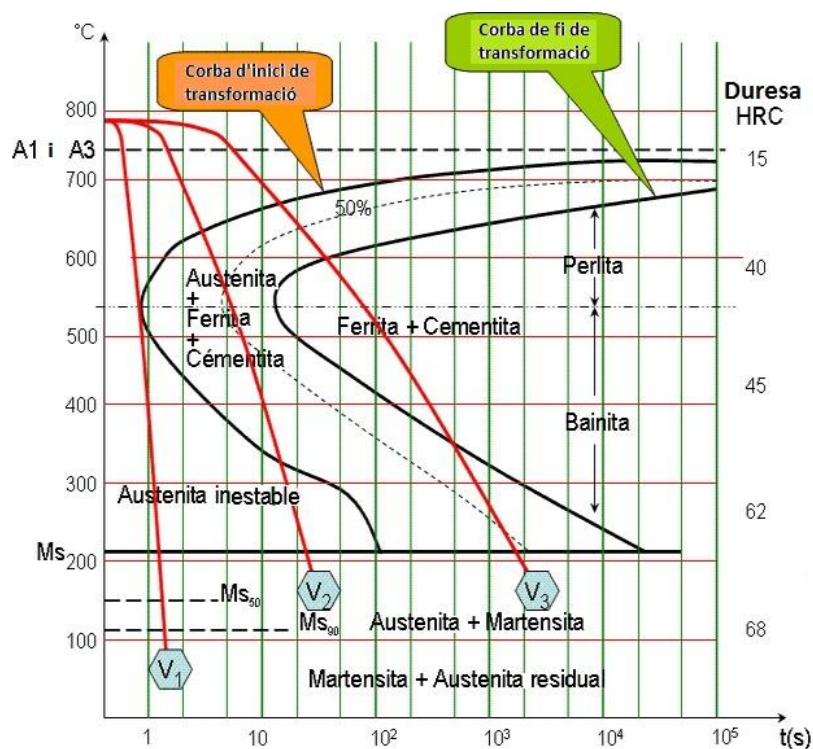


Figura 2-1 Diagrama de transformació amb diferents velocitats de refredament (V_1 , V_2 i V_3) i estructures que s'obtenen amb cada una d'elles (Font: [24]).

Per a realitzar el refredament de l'acer existeixen una àmplia varietat de medis de tremp a la indústria, dintre dels quals es troba l'aigua, la salmorra (solució d'aigua amb sal), olis minerals i vegetals, solucions de polímers, banys de sals i llits fluïditzats. La selecció del medi de tremp depèn de la templabilitat de l'acer en qüestió (profunditat i distribució de la duresa a l'interior de la peça d'acer trempada), el grossor de la secció, la forma de la peça, i les velocitats de refredament necessàries per aconseguir la microestructura desitjada. És molt important entendre els mecanismes de refredament i els factors que afecten al procés, ja que aquests factors poden tenir una influència significant a l'hora d'escollir el medi de refredament i el desitjat comportament obtingut, per part de l'acer, a partir del procés de tremp.

L'aigua i l'oli són els fluids més emprats per a endurir l'acer. Aparentment el tremp en aigua és molt més ràpid en comparació amb el tremp en oli, per tant al ser més sever és molt més propens a produir esquerdes durant el procés de refredament. Com a conseqüència, l'oli es presenta com el medi més comú per a realitzar el tremp de l'acer.

Existeixen dos mètodes per determinar l'habilitat del medi de refredament per a extreure calor: el mecànic i el tèrmic. El mètode mecànic es basa en la mesura de la duresa aconseguida en la peça. Aquest mètode determina la profunditat de la formació de martensita sota les condicions aplicades de tremp. En canvi, el mètode tèrmic implica la mesura del temps necessari per refredar d'una temperatura inicial a una altre final. En aquest cas es determina la velocitat de refredament de la mostra i es veu la capacitat que presenta el fluid per extreure la calor [3]. L'estudi del procés de tremp mitjançant l'anàlisi de les corbes de refredament és cada vegada més popular i pot ser el mètode més informatiu per a caracteritzar un medi de refredament.

El control dels processos de tractaments tèrmics en acers esta sent contínuament investigat i aplicat. Un dels paràmetres fonamentals i més importants durant el procés de refredament és el coeficient de transferència de calor per convecció [2, 3]. Actualment, és un dels paràmetres que dificulten més la predicció del refredament que pateix la peça, ja que és el paràmetre que controla la transferència de calor entre el component i el líquid, i és molt difícil de caracteritzar.

La conductivitat tèrmica de l'acer també és un factor a tenir en compte en els tractaments tèrmics i ús dels acers. Els gradients de temperatura durant el refredament poden portar a gradients microestructurals, com també a tensions residuals en els components.

Aquest projecte està enfocat a caracteritzar el comportament d'uns determinats acers en diferents medis de tremp, com ara són l'aigua salada i l'oli, en diferents condicions inicials.

3. OBJECTIUS

Un cop esmentades les necessitats de Rovalma S.A, es presenten els objectius que es volen assolir en el projecte.

3.1. Objectiu general

L'objectiu general d'aquest treball consisteix en crear una base de dades que recopili els diferents comportaments de refredament per a un conjunt d'acers amb diferent composició química. A més a més, es pretén instaurar una metodologia que serveix per caracteritzar diferents medis de tremp mitjançant la representació de les seves corbes de refredament.

3.2. Objectius específics

Per tal de poder assolir l'objectiu general cal, prèviament, aconseguir una sèrie d'objectius específics, l'agrupació dels qual conforma la globalitat del projecte:

- Estudiar les diferents estructures que presenten els acers, i les transformacions estructurals que poden patir durant el procés de tremp.
- Investigar i entendre la relació que existeix entre el tipus de medi de tremp i la temperatura a la qual es realitza el tractament tèrmic, amb la velocitat de refredament i el coeficient de transferència de calor.
- Determinar experimentalment el coeficient de transferència de calor enfront de la temperatura de la superfície per a cada material, mitjançant la realització d'uns assajos amb les seves condicions controlades.
- Comparar els coeficients de transferència de calor experimentals amb els coeficients de convecció calculats mitjançant les correlacions de la literatura.
- Elaborar un programa de càlcul per predir les corbes de refredament per al punt més exterior d'un bloc d'acer mitjançant el coeficient de convecció obtingut de manera experimental.
- Realitzar una estimació del cost econòmic de les experimentacions dutes a terme.
- Estudiar l'impacte ambiental mitjançant l'estudi de la recuperació i reutilització dels olis de tremp.

4. ABAST DEL PROJECTE

El projecte s'estructura en un total de 12 capítols, cadascun dels quals presenta la seva importància.

En el Capítol 1 es fa una breu explicació sobre l'origen del projecte a partir de les necessitats plantejades per part de l'empresa.

Seguidament en els Capítols 2 i 3, el quals ja s'han introduït, es realitza una introducció en la qual s'introdueix al lector en el coneixement del tractament tèrmic del tremp, i la seva aplicació en els acers per a eines. També es descriuen els objectius plantejats que es pretenen assolir a l'hora de realitzar l'estudi.

En el present Capítol 4 es descriu de manera general com queda estructurat el treball amb una descripció de tots el capítols que es poden veure en el projecte.

Pel que fa al Capítol 5, es troba la base teòrica del projecte. Tracta sobre les diferents estructures que pot presentar el ferro, i la manera d'aconseguir-les segons el refredament provocat en la peça d'acer. També, descriu més detalladament les etapes de refredament que es donen per als medis de tremp líquids, com també les correlacions amb els paràmetres que les caracteritzen. A més a més, explica la manera de caracteritzar i interpretar una corba de refredament per a un acer. Finalment, mostra els mètodes de càlcul emprats per a la determinació del coeficient de convecció per a una proveta d'assaig ($Bi < 0,1$), i la predicció de corbes de refredament per a un cos 3D.

En canvi, durant el Capítol 6, es mostra el procediment experimental dut a terme. Bàsicament el projecte es divideix en dues experimentacions. Una primera part a nivell de laboratori, que consistirà en la metodologia emprada per a la determinació experimental de les corbes de refredament i velocitats de refredament segons el medi, temperatura del bany i acer d'estudi. I finalment, una segona part a on es portarà l'estudi anterior a una escala major. En aquest cas d'estudi s'observarà quina és la influència que presenten els medis de tremps en qüestió sobre una de les aleacions d'interès, i quines propietats mecàniques finals adquireix el nostre material d'estudi.

Un cop realitzada l'experimentació, en el Capítol 7, es presenten els resultats obtinguts per ambdós assajos. En aquest apartat es representen gràficament les corbes de refredament, velocitat de refredament i es calculen els coeficients de transmissió de calor a partir de les dades de temperatura-temps registrades per a la primera part. També, es realitza un estudi comparatiu de les dades experimentals obtingudes amb les correlacions presentades en la literatura. Per a la segona part, es mostren gràficament les corbes de refredament i velocitats de refredament registrades en els diferents punts d'interès de la peça. A més a més, es realitza una predicció de la corba de refredament, en la superfície, mitjançant l'elaboració d'un programa de càlcul.

Seguidament, en el Capítol 8 i 9, es mostra l'elaboració d'un pressupost econòmic aproximat del cost total de l'experimentació, i s'explica una alternativa a l'impacte ambiental produït pels olis de tremp. En aquest capítol es descriu la manera de recuperar i reutilitzar els olis destinats al tractament tèrmic.

Per acabar, el projecte es conclou amb el Capítol 10, en el qual es presenten les principals conclusions extretes per ambdues experimentacions. A més a més, es donen alguns suggeriments per un futur treball.

Finalment, el Capítol 11 i Capítol 12 mostren els agraïments de l'autor i la bibliografia emprada, respectivament.

5. ANTECEDENTS TEÒRICS

5.1. Fases metal·lúrgiques de l'acer

La base per entendre el tractament tèrmic pels acers, i les transformacions estructurals que poden arribar a ocórrer, és troba en el diagrama Fe-C (Figura 5.1). Aquest diagrama mostra quines són les fases que són d'esperar a l'equilibri per a diferents combinacions de contingut de carboni i temperatura.

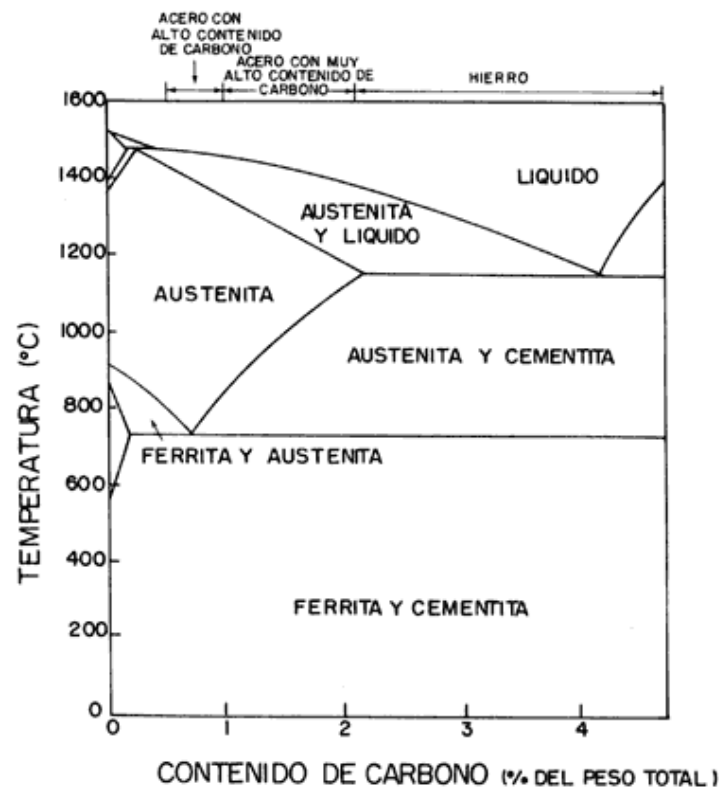


Figura 5-1 Diagrama de fases per als acers (Font: [25])

El ferro pur està present en tres estats al·lotròpics a mesura que s'incrementa la temperatura partint de la temperatura ambient [1]. A continuació es descriu les diferents estructures en que es pot trobar l'acer:

- Fins els 911°C, el ferro cristal·litza en el sistema cúbic de cos centrat (BCC) i rep el nom de ferrita α . És un material dúctil, mal·leable i que pot dissoldre petites quantitats de carboni. Com a característica principal és el constituent més tou dels acers. A la Figura 5.2 es mostra l'empaquetament d'àtoms en la ferrita. S'observa com els àtoms de ferro ocupen les cantonades i el centre del cub. Els

pocs àtoms que accepta la ferrita troben lloc en els forats que queden entre les esferes de ferro. Per tant, els àtoms de carboni solament es poden situar en llocs com el que es senyala a la figura:

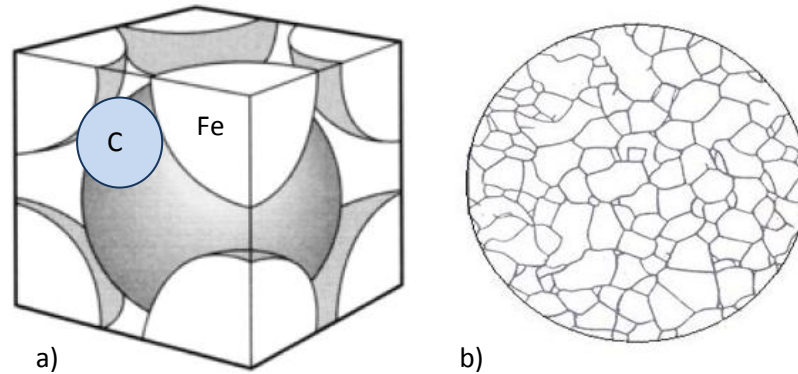


Figura 5-2 a) Estructura BCC de la fase ferrita- α ; b) Micrografia de la ferrita (Font: [4])

- Entre els 911 i 1400°C, el ferro cristal·litza en el sistema cúbic de cares centrades (FCC) i rep el nom d'austenita. Aquest material es pot deformar amb major facilitat degut a que presenta una estructura blanda i tenaç. Les seves característiques mecàniques varien amb la composició. Tal com es pot observar a la Figura 5.3, els àtoms de ferro s'acomoden ocupant les cantonades i el centre de cada cara en una estructura cúbica centrada en les cares (FCC). En aquest cas, els àtoms de carboni es situen en el centre de cada aresta dels cubs:

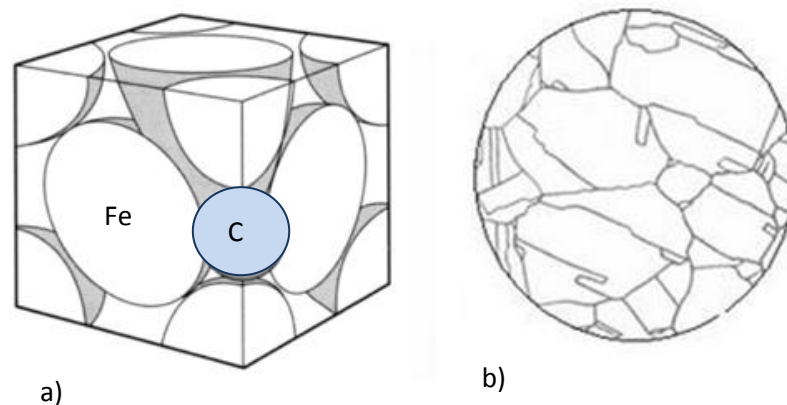


Figura 5-3 a) Estructura FCC de la fase austenita b) Micrografia de la austenita (Font: [4])

- Entre 1400 i 1538°C, el ferro cristal·litza de nou en sistema cúbic de cos centrat (BCC) i rep el nom de ferro δ .

Si s'afegeix carboni, aquests àtoms es poden situar als intersticis de la xarxa cristal·lina del ferro i formar el material anomenat cementita (Fe_3C). Aquesta estructura té una xarxa cristal·lina ortoròmbica complexa, i és un compost intersticial molt dur i fràgil amb una baixa resistència a la tensió però alta resistència a la compressió (Figura 5.4).

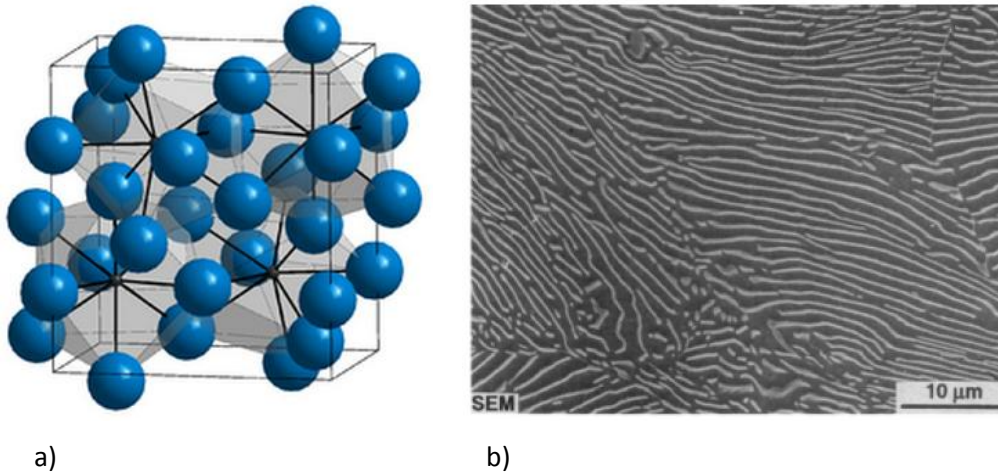


Figura 5-4 a) Estructura ortoròmbica complexa de la cementita b) Micrografia de la cementita visualitzat a alta magnificació amb un SEM (Scanning Electron Microscope) (Font: [5])

D'altra banda, també es poden formar regions amb mescles de dues fases, per exemple, ferrita + cementita, austenita + cementita, i ferrita + austenita. Finalment, a les temperatures més elevades el ferro es troba en estat líquid.

Les microestructures dels acers són el resultat de la transformació de la austenita durant el seu refredament [6]. Les estructures que s'han presentat anteriorment s'anomenen estructures perlítics, i es poden obtenir mitjançant el refredament lent dels acers. No obstant, modificant les condicions de refredament és possible obtenir estructures cristal·lines diferents i que no apareixen en el diagrama d'equilibri Fe-C, com ara les estructures martensítiques i bainítics.

5.1.1. Estructura Martensítica

La martensita és una estructura metaestable que es forma en condicions no isotèrmiques. El mecanisme de transformació de la martensita es basa en un canvi de temperatura tan ràpid que causa un desplaçament per cisallament dels àtoms i moviments atòmics individuals de menys d'una separació interatòmica. La transformació també depèn de la temperatura, ja que la martensita es comença a formar a una temperatura M_s , i la transformació finalitza quan s'arriba a una temperatura de finalització M_f . Cal destacar que cada metall presenta la seva pròpia temperatura M_s i M_f [4].

La martensita és el constituent típic dels acers trempats i s'obté de manera instantània al refredar ràpidament una estructura austenítica, el qual presenta una estructura FCC, a una estructura BCT (Figura 5.5). Aquesta estructura s'aconsegueix mitjançant el desplaçament dels àtoms de ferro aconseguint una solució sobresaturada de carboni en ferrita. L'única diferència entre una estructura BCC i una estructura BCT, és que aquesta última no és un cub ja que s'estira en l'aresta vertical [7]. Per tant, els àtoms de carboni assoliran una posició diferent respecte a l'altre xarxa cristal·lina.

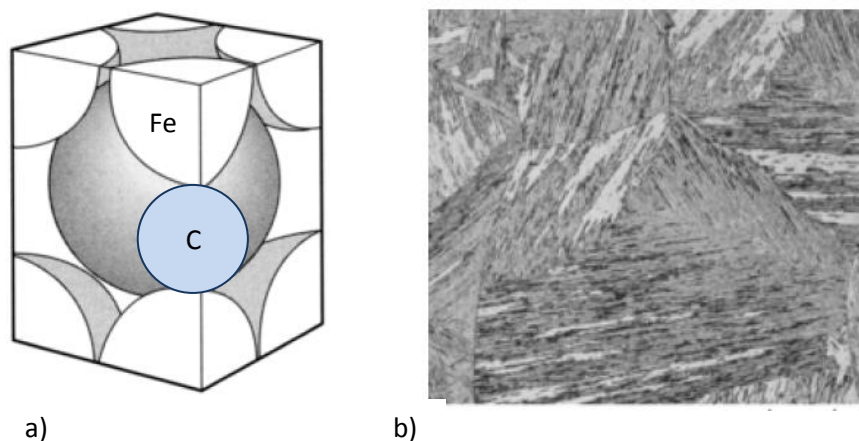


Figura 5-5 a) Estructura de la martensita b) Micrografia de la martensita (Font:[4])

La martensita obtinguda en el tremp té una duresa elevada, però lamentablement, les tensions al voltant dels àtoms de carboni atrapats en la xarxa cristal·lina del ferro produeixen fragilitat en les peces trempades. Aquest fet, no solament pot provocar esquerdes en el material durant el seu ús, sinó que les peces es poden fissurar espontàniament, simplement estant emmagatzemades. Per tal d'evitar-ho s'ha de

reduir la fragilitat. Per això les peces són sotmeses a un escalfament immediatament posterior al tremp, denominat revingut. Com a conseqüència s'observarà una disminució de la duresa final, però s'evitarà el risc d'esquerdament [8].

5.1.2. Estructura Bainítica

La bainita té una estructura similar a la perlita formada per agulles de ferrita i cementita (Figura 5.6) que s'aconsegueix amb velocitats de refredament intermèdies. Una estructura bainítica es pot obtenir mitjançant una transformació isotèrmica a totes les temperatures on la formació de perlita i ferrita proeutectoide és lenta, i també, a temperatures inferiors a la temperatura d'inici de transformació martensítica (M_s).

La bainita superior, la qual es forma a temperatures altes ($400 - 550^{\circ}\text{C}$) consisteix en feixos de plaques de ferrita amb partícules de cementita localitzades entre les plaques. Per altra banda, la bainita inferior es troba caracteritzada per partícules fines de cementita dins de les plaques de ferrita, a més de les que ja es troben entre les plaques [9].

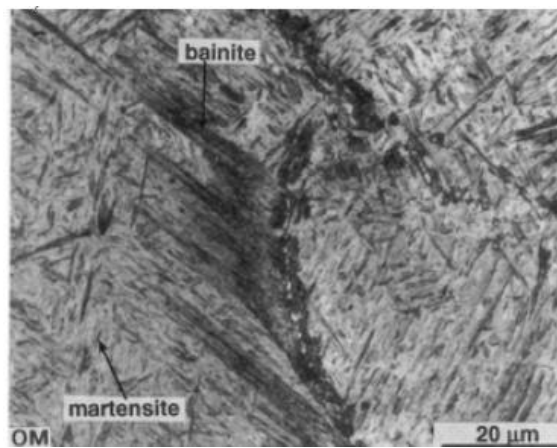


Figura 5-6 Micrografia de la bainita (Font: [4])

La bainita és un terme entremig de perlita i martensita en termes de duresa. Per aquesta raó, la microestructura bainítica no requereix tractaments tèrmics addicionals després del refredament inicial per a aconseguir valors de duresa entre els acers perlítics i martensítics [10].

Algunes temperatures límit importants que es troben entre les regions d'una sola fase se'ls proporciona un nom especial amb el qual s'identifiquen [1]. Es denominen temperatures de transformació, i es defineixen com aquelles temperatures a les qual es produeix un canvi de fase. Algunes d'elles són:

- Temperatura **A_{c1}** o **A_1** , correspon a la temperatura que s'inicia la formació d'austenita durant l'escalfament.
- Temperatura **A_{c3}** o **A_3** , correspon a la temperatura en la qual la transformació de ferrita a austenita és completa durant l'escalfament.
- Temperatura **M_s** , és la temperatura a on s'inicia la transformació d'austenita a martensita durant el refredament.
- Temperatura **M_f** , és la temperatura a la qual la formació de martensita finalitza durant el refredament.

En la Taula 5.1 es fa un recull de les fases metal·lúrgiques que es poden donar en els acers. En ella es mostra la estructura cristal·lina de cada fase, i les seves principals característiques.

Fase	Estructura cristal·lina	Característiques
Ferrita (α)	BCC	Fase tova de baixa temperatura; Fase d'equilibri estable
Ferrita (δ)	BCC	Isomorfa amb Ferrita (α); Fase d'alta temperatura; Fase d'equilibri estable
Austenita (γ)	FCC	Fase tova de mitjana temperatura; Fase d'equilibri estable
Cementita (Fe_3C)	Complex ortoròmbic	Fase dura metaestable
Perlita		Microconstituent metaestable; Barreja de làmines de ferrita i cementita
Bainita		Fase dura metaestable; Mescla no laminar de ferrita i cementita a petita escala;
Martensita	BCT (solució sobresaturada de carboni en ferrita)	Fase dura metaestable; És la forma estructural amb més duresa de totes

Taula 5-1 Fases metal·lúrgiques importants per als acers (Font: [1])

Segons la finalitat de la peça d'acer, interessarà aconseguir una estructura cristal·lina o una altra. En un acer per a eines l'estructura que més convé és la martensítica, ja que dotarà al material de les característiques més aptes per dur a terme la seva funció.

5.2. Tipus de convecció tèrmica en el bany

La funció principal del fluid de tremp és controlar la taxa de transferència de calor de la superfície del sòlid que s'està trempant. Les corbes de refredament s'obtenen trempant una mostra de l'acer d'interès, en la qual es situa un o més termoparells per a registrar l'evolució de la temperatura. Aquestes corbes resultants de temperatura reflecteixen les característiques d'eliminació de calor que s'han aconseguit amb el medi de tremp emprat.

Per als medis líquids més comuns i que s'estudiaran en el present projecte, com ara l'aigua amb sal i l'oli, generalment el refredament s'esdevé en 3 etapes diferents, ebullició de pel·lícula, ebullició nucleada i etapes de convecció, cadascuna de les quals tenen diferents característiques [2].

La Figura 5.7 i la Figura 5.8 mostren els mecanismes de refredament que passen durant el procés de tremp.

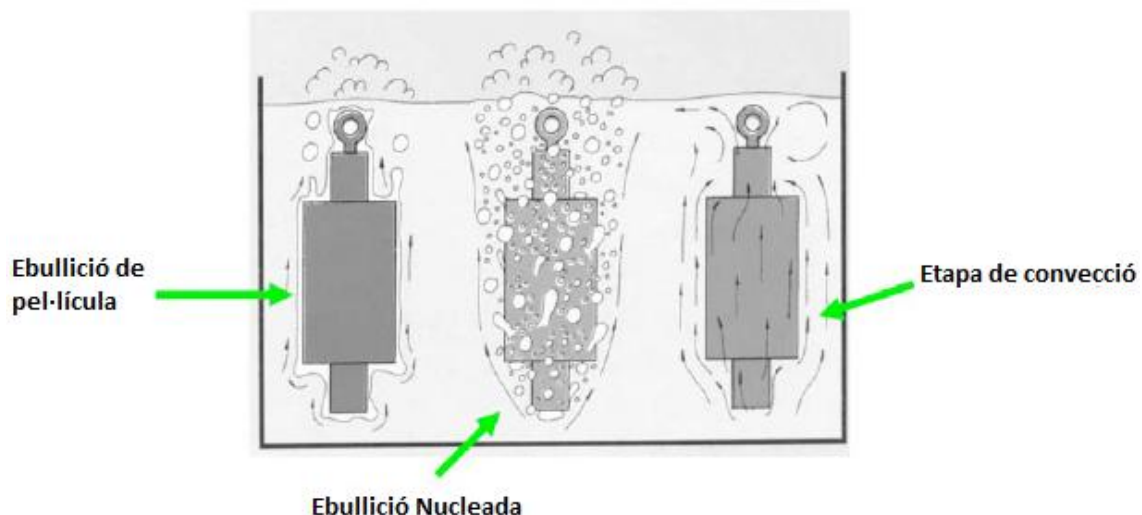


Figura 5-7 Representació de les tres etapes de refredament en el tremp en un líquid
(Font:[12])

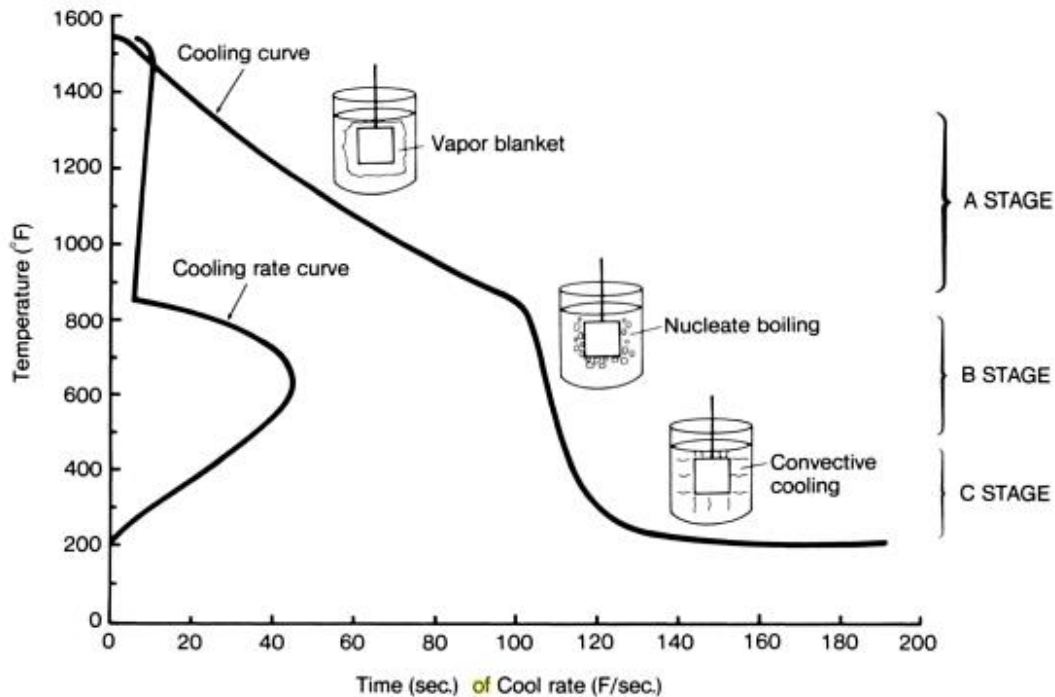


Figura 5-8 Corba de refredament i corba de velocitat de refredament en el centre d'una proveta de diàmetre 25mm trempada en aigua a 95°C amb l'aigua fluïnt a 0,25m/s
(Font:[1])

Donada l'elevada temperatura inicial de la peça a tractar, el fluid refrigerant experimenta un canvi de fase. Generalment, en la primera fase del trempat, es forma una pel·lícula de vapor que aïlla al sòlid del líquid, i, com a conseqüència, s'obté un refredament més lent a mesura que es forma la capa de vapor. Un cop la temperatura ha disminuït, apareix l'ebullició nucleada la qual es caracteritza pel trencament de la pel·lícula de vapor. És en aquesta fase on s'aconsegueixen grans extraccions de calor. Finalment, el procés de refredament acaba amb l'etapa de convecció a on el líquid mulla completament la superfície del sòlid.

Una apreciació d'aquests mecanismes físics es pot obtenir mitjançant l'examen dels diferents règims que es produeixen en el bany d'ebullició. Aquest règims es poden identificar en la corba d'ebullició de la Figura 5.9. Aquest corba pertany a l'aigua a 1 atm de pressió, encara que altres fluids presenten tendències similars. Es nota que q''_s depèn del coeficient de convecció h , així com l'excés de temperatura ΔT_e , definint com $\Delta T_e = T_s - T_{sat}$.

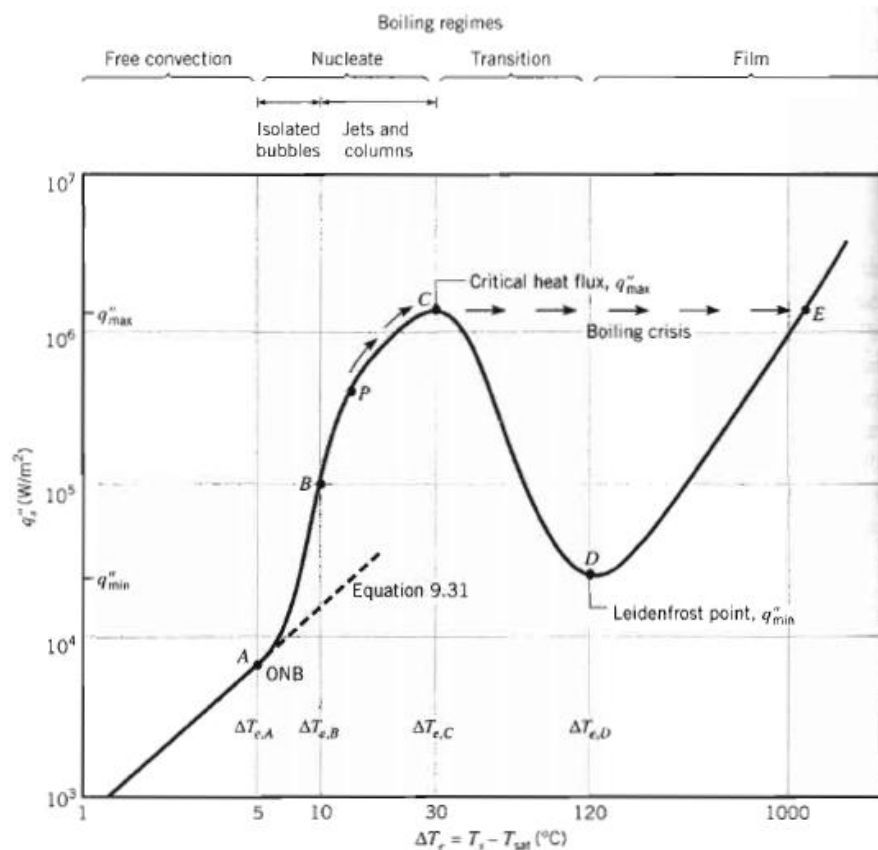


Figura 5-9 Corba d'ebullició típica per a l'aigua a 1 atm: flux de calor de la superfície q''_s , com a funció de l'excés de temperatura ΔT_e (Font:[16])

Els diferents règims d'ebullició, els quals es defineixen en el següent apartat, es poden distingir segons el valor ΔT_e en el que es troba. A continuació es mostren els valor definits per la literatura:

- Quan $\Delta T_e \leq 5^\circ\text{C}$, es dona l'etapa d'ebullició per convecció lliure.
- Quan $5^\circ\text{C} \leq \Delta T_e \leq 30^\circ\text{C}$, es presenta l'etapa d'ebullició nucleada.
- Amb $30^\circ\text{C} \leq \Delta T_e \leq 120^\circ\text{C}$, es produeix la transició entre l'etapa d'ebullició nucleada i l'etapa d'ebullició per pel·lícula.
- Finalment, amb $\Delta T_e \geq 120^\circ\text{C}$, es presenta completament l'etapa d'ebullició per pel·lícula.

5.2.1. Ebullició de pel·lícula

La primera etapa del refredament es troba caracteritzada per la formació d'una capa de vapor al voltant de la peça. Quan l'acer calent entra en contacte amb el líquid, immediatament es formen les bombolles de vapor i creixen a la interfície calenta. Aquesta capa de vapor es desenvolupa i es manté mentre el subministrament de

calor de l'interior de la peça fins a la superfície excedeix la quantitat de calor necessària per evaporar el medi fluid i mantindre la fase vapor [12,20]. Aquesta capa actua com un aïllant i comença a desaparèixer quan la temperatura de Leidenfrost, que correspon a la temperatura per sobre de la qual es manté una capa de vapor total, s'aconsegueix. Si ens fixem en la Figura 5.8, veiem com en aquesta etapa la velocitat disminueix a mesura que es va generant la capa de vapor, per això, és un període de refredament relativament lent ja que la transmissió de calor s'aconsegueix per mitjà de radiació i conducció a través de la capa de vapor.

El procés d'humectació es produeix durant la transició de l'ebullició de pel·lícula a l'ebullició nucleada. Aquesta temperatura de transició es coneix com la temperatura de Leidenfrost, i és independent de la temperatura inicial de la peça que es vol trempar, tal com va demostrar Beck (1967) [1] . A la Figura 5.10 es mostra aquest fenomen:

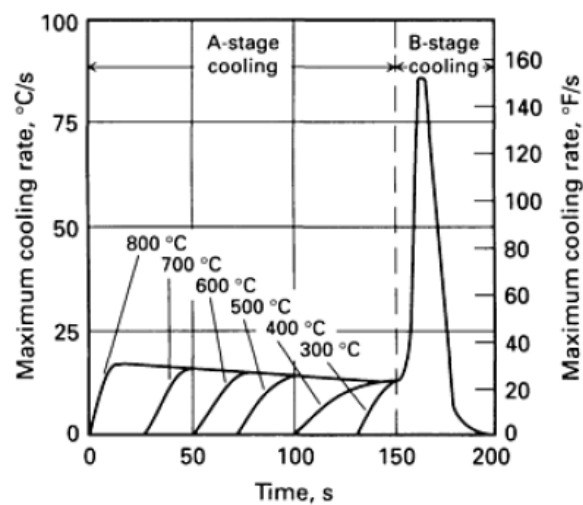


Figura 5-10 Velocitat de refredament per a una proveta d'Inconel de diàmetre 24 mm i longitud 72 mm, trempada en aigua entre les temperatures de 300 i 800°C fins a 100°C (Font: [1])

Com es pot comprovar en la imatge, l'inici de la segona fase de refredament (anomenat B-stage en la Figura 5.10), ocorre en el instant en que la proveta, trempada a diferents temperatures, assoleix una mateixa temperatura.

L'etapa d'ebullició de pel·lícula no existeix en aquelles peces que son trempades en solucions aquoses amb més d'un 5% de pes de material iònic com ara pot ser el clorur

de sodi o sal. En aquests casos el refredament s'inicia directament amb l'ebullició nucleada [1,2]. Això es degut a que la sal saturada es diposita en el metall i es escalfada pel propi metall, l'aigua escapa de la sal mitjançant explosions microscòpiques produint el trencament de la capa de vapor, i per tant, facilitant la desaparició de les bombolles de vapor [1,3].

5.2.2. Ebullició nucleada

La segona etapa de refredament es produeix després de l'ebullició de pel·lícula, i es denomina ebullició nucleada. Aquest mecanisme de refredament es troba caracteritzat per una ebullició violenta a la superfície del metall. Eventualment la capa de vapor estable desapareix i permet que el medi líquid fred entri en contacte amb la superfície calenta del metall, donant pas a una ebullició nucleada i gran taxes d'extracció de calor. Aquest líquid fred i nou es calenta fins al punt d'ebullició i es comença a formar vapor un altre cop [3,12,20,21]. Aquest procés es repeteix constantment fins que es deixa de donar lloc el canvi de fase del líquid, per això, aquesta etapa ens proporciona grans velocitats de refredament.

En l'ebullició nucleada s'han arribat a determinar correlacions del coeficient de convecció tèrmica per a superfícies llises, encara que no s'han pogut determinar per altres superfícies degut a la complexitat del procés. Independentment, l'objectiu per a la indústria de tractaments tèrmics recau en la capacitat de poder calcular un coeficient de transmissió de calor efectiu per al procés.

5.2.3. Etapa de convecció

L'etapa de convecció s'inicia quan el metall es refreda just per sota del punt d'ebullició del fluid de refredament. Com el refredament continua, la temperatura de la superfície es troba per sota del punt d'ebullició del líquid i la superfície del metall es mulla completament pel fluid [20,21]. En aquest punt, la velocitat de refredament és baixa i es troba determinada pel fenomen de convecció i la viscositat del fluid de refredament. La temperatura de transició de l'ebullició nucleada a l'etapa de convecció és funció del punt d'ebullició del líquid.

La calor s'extreu molt lentament durant aquest procés. La transmissió de calor en aquesta regió es troba afectada per varies variables de procés, com ara l'agitació, la

viscositat del fluid de refredament i la temperatura del bany. Per exemple, les velocitats de refredament decreixen si la viscositat del medi de tremp incrementa.

En resum, durant el refredament, la duració de la fase vapor (ebullició de pel·lícula) i la temperatura sobre la qual es presenta la velocitat màxima de refredament tenen una gran influència en l'habilitat del medi per endurir l'acer completament. Generalment, en un procés de tremp òptim es requereix alta velocitat de refredament per aquesta etapa juntament amb l'etapa d'ebullició nucleada.

Per altra banda, la velocitat de refredament en l'etapa de convecció també presenta la seva importància, ja que generalment sota aquest interval de temperatura es produeix la transformació martensítica i pot influir l'aparició de tensions residuals, distorsió i acabar produint-se esquerdes. Per això, la velocitat de refredament per aquesta fase ha de ser lo suficientment lenta.

5.2.4. Correlacions per a les etapes de refredament

Tal com s'ha introduït en els apartats previs, la transferència de calor durant la fase de refredament del tremp es troba controlada per 3 mecanismes diferents: ebullició en pel·lícula, ebullició nucleada i convecció sense canvi de fase. Cadascun d'aquests mecanismes de transferència de calor es pot modelar mitjançant la Llei de Refredament de Newton (Equació 5.1), on q és la potència transferida de la peça calenta al bany, h és el coeficient de convecció, A l'àrea de transferència de calor, T_s la temperatura de la superfície de la peça i T_b la temperatura del bany.

$$q = h \cdot A \cdot (T_s - T_b) \quad \text{Equació 5.1}$$

El punt crític per una bona predicció de la potència transferida és, sempre, el valor del coeficient de convecció, h . Tret d'algunes situacions sense canvi de fase, en règim laminar i en condicions de treball molt senzilles, l'avaluació del coeficient de convecció és extremadament difícil i depèn de molt paràmetres com la geometria, el tipus de fluid, el rang de temperatures de treball, la velocitat del fluid, etc. Sovint, la predicció del coeficient de convecció, h , depèn de correlacions semi-analítiques o purament experimentals.

La presència de canvi de fase i el tipus en què aquesta es dona és un paràmetre clau per la determinació del coeficient de convecció. De fet, les correlacions existents en canvi de fase, tot i ser nombroses, presenten un bon comportament únicament en casos molt similars als experiments d'on s'han avaluat. Fora d'aquestes condicions, el marge d'error que presenten pot ser molt alt, de l'ordre del 100% o més [23].

En aquest capítol, s'introdueixen algunes de les moltes correlacions que modelen el coeficient de convecció en les diferents etapes de refredament del tremp. En el capítol 7.1.4 s'avalua l'aplicabilitat d'aquestes correlacions sota les condicions dels experiments realitzats.

En l'anàlisi de la convecció sovint es treu les dimensions a les expressions físico-matemàtiques que modelen el mecanisme i s'agrupen les variables, donant a lloc als números adimensionals. Al llarg del projecte s'empren els següents números adimensionals:

- **Número de Nusselt (Nu):** Definit en termes de la conductivitat tèrmica del fluid. Representa la relació existent entre la calor transferida per convecció a través del fluid i la que es transferiria si solament existís conducció (Equació 5.2).

$$Nu = \frac{h \cdot L_c}{k} \quad \text{Equació 5.2}$$

- **Número de Prandtl (Pr):** Relació que existeix entre la difusivitat molecular de la quantitat de moviment i la difusivitat molecular de la calor, o entre l'espessor de la capa límit de velocitat i la capa límit tèrmica (Equació 5.3).

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\mu \cdot C_p}{k} \quad \text{Equació 5.3}$$

- **Número de Grashof (Gr):** Indica la raó de les forces d'empenta a les forces viscoses que actuen sobre el fluid (Equació 5.4).

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty) \cdot L_c^3}{\nu^2} \quad \text{Equació 5.4}$$

- **Número de Rayleigh (Ra):** És funció del número de Grashof i el número de Prandtl (Equació 5.5).

$$Ra = Gr \cdot Pr$$

Equació 5.5

• Correlació per l'etapa de pel·lícula

En la literatura existeix una varietat desconcertant de relacions per a la descripció de la transferència de calor en l'etapa de pel·lícula. Generalment, aquestes relacions tenen alguna base teòrica, encara que també és habitual incloure constants empíriques per tal que el marc teòric estigui en línia amb les dades experimentals.

Degut al baix coeficient de transferència de calor trobat per a aquesta etapa, la temperatura de la superfície pot ser molt elevada, i això, pot conduir a l'existència d'una component de radiació en el flux de calor. És una pràctica habitual definir el coeficient de convecció total, h , com la suma d'un coeficient convectiu, h_c , i un factor J multiplicat per un coeficient de transferència de calor per radiació, h_r , tal com es mostra a continuació (Equació 5.6):

$$h = h_c + J \cdot h_r$$

Equació 5.6

h_r segueix la següent expressió (Equació 5.7):

$$h_r = \left[\frac{\sigma_s}{\frac{1}{e_s} + \frac{1}{e_l} - 1} \right] \cdot \left[\frac{T_s^4 - T_{sat}^4}{T_s - T_{sat}} \right]$$

Equació 5.7

on

σ_s = constant de Stefan-Boltzmann; $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ [W/m}^2 \cdot \text{k}^4]$

e = emissivitats de la superfície del sòlid (e_s) i del líquid (e_l)

J = constant amb un valor assignat de 0,75

Seguint l'estudi realitzat per Bromley (1950) per als cilindres, Hsu and Westwater (1960) van derivar una nova expressió per a l'etapa de pel·lícula en una superfície

vertical. La mitjana per a h_c en una superfície vertical de longitud L , la qual s'emptra en futurs càlculs degut a l'aproximat que presenta entorn als assajos que es realitzen en el projecte, segueix la següent forma (Equació 5.8) [22]:

$$h_c = 0,943 \cdot \left[\frac{g \cdot (\rho_l - \rho_g) \cdot \rho_g \cdot k_g^3 \cdot h'_{lg}}{L \cdot \mu_g \cdot (T_s - T_{sat})} \right]^{\frac{1}{4}} \quad \text{Equació 5.8}$$

on

g = gravetat, $[m/s^2]$

ρ_l = densitat del medi en estat líquid, $[kg/m^3]$

ρ_g = densitat del medi en estat gasós, $[kg/m^3]$

k_g = conductivitat del medi en estat gasós, $[W/m \cdot K]$

h'_{lg} = calor latent de vaporització corregit; $h'_{lg} = h_{lg} \cdot \left[1 + \frac{C_{pg} \cdot (T_s - T_{sat})}{h_{lg}} \right]$, $[J/kg]$

L = longitud vertical del sòlid, $[m]$

μ_g = viscositat del medi en estat gasós, $[kg \cdot m/s]$

T_s = temperatura de la superfície del sòlid, $[K]$

T_{sat} = temperatura de saturació del medi $[K]$

• Correlació per l'etapa d'ebullició nucleada

Per a la segona etapa de refredament, és evident que a partir dels resultats extrets pel comportament de nucleació i dels efectes dels paràmetres que protagonitzen el procés, la producció de correlacions que descriuen la transferència de calor és plena de dificultats. A més a més, tot i que actualment el procés de nucleació es comprèn millor, particularment no ajuda a la predicció de l'ebullició d'un fluid arbitrari en una superfície de característiques desconegudes. No obstant, la necessitat de calcular el coeficient de transferència de calor per aquests sistemes fan que l'ús de correlacions es faci inevitable, tot i que s'han de tenir presents les incerteses existents.

En l'ebullició nucleada, el líquid adjacent a la superfície de la peça es sobreescalfa, llavors és empès cap en fora, i es barreja amb el líquid. Pel mecanisme de transferència de calor d'aquesta etapa s'ha de tenir en compte:

- La conducció de calor transitòria de la superfície escalfada al líquid adjacent.
- Convecció natural en zones inactives de la superfície d'escalfament.
- Evaporació de les petites bombolles de vapor que es formen.

Una àmplia varietat de correlacions, per a la transferència de calor en l'etapa d'ebullició nucleada, s'han publicat en la literatura. El problema és que és molt difícil apropar-se a estimar els seus valor, ja que la distribució de llocs de nucleació és desconeguda.

Tot i la gran varietat de correlacions existents que descriuen aquest procés, el desconeixement d'alguns dels paràmetres como ara el diàmetre de bombolla i flux de calor extret entre d'altres, provoquen el rebuig de moltes d'elles. En el present projecte es presenta, i s'empra per a futurs càlculs, la correlació de Forster i Zuber (1955), la qual s'utilitza (tant en convecció natural com en convecció forçada) com la base per a les contribucions d'ebullició nucleada en la transferència de calor per convecció en la correlació de Chen (1966) [22, 23].

La correlació de Forster i Zuber (1955) es va desenvolupar de manera adimensional, però comunament s'utilitza mitjançant la següent expressió dimensional (on totes les unitats han de ser sistema internacional; Equació 5.9).

$$h = 0,00122 \cdot \left[\frac{k_l^{0,79} \cdot C p_l^{0,45} \cdot \rho_l^{0,49}}{\sigma^{0,5} \cdot \mu_l^{0,29} \cdot h_{fg}^{0,24} \cdot \rho_v^{0,24}} \right] \cdot [T_w - T_{sat}]^{0,24} \cdot [p_{sat} - p_l]^{0,75} \quad \text{Equació 5.9}$$

on,

k_l = conductivitat tèrmica del fluid en estat líquid, [W/m·K]

$C p_l$ = capacitat calorífica del líquid, [J/kg·K]

ρ_l = densitat del fluid en estat líquid, [kg/m³]

ρ_v = densitat del fluid en estat gasós, [kg/m³]

σ = tensió superficial, [N/m]

μ_l = viscositat del fluid en estat líquid, [kg/m·s]

h_{fg} = calor latent de vaporització, [J/kg]

T_s = temperatura de la superfície del sòlid, [K]

T_{sat} = temperatura de saturació del fluid, [K]

p_{sat} = pressió de saturació del fluid a la temperatura de la superfície, [Pa]

p_l = pressió de saturació del fluid a la temperatura del líquid, [Pa]

• Correlació per l'etapa de convecció

L'última de les fases de refredament és l'etapa de convecció sense canvi de fase. Per a un cilindre vertical, si la proporció del diàmetre amb l'altura, D/L , es suficientment llarg, el gruix de la capa límit tèrmica serà molt menor que el radi del cilindre i les correlacions en convecció natural per a una superfície vertical es poden utilitzar per a calcular el coeficient de convecció en un cilindre. Per a un fluid amb nombre de Prandtl major a 1, la condició sota la qual la correlació per a una superfície vertical és aplicable és (Bejan, 2004; Equació 5.10)[23]:

$$\frac{D}{L} > Ra_L^{-\frac{1}{4}} \quad \text{Equació 5.10}$$

Per tal de calcular el coeficient de convecció per aquesta etapa, Ede (1964) va suggerir la següent expressió (Equació 5.11) [23]:

$$Nu_x = \frac{4}{3} \cdot \left[\frac{2 \cdot Pr}{5 \cdot \left(1 + 2 \cdot Pr^{\frac{1}{2}} + 2 \cdot Pr \right)} \right]^{\frac{1}{4}} \cdot Ra_x^{\frac{1}{4}} \quad \text{Equació 5.11}$$

En resum, moltes propietats físiques del medi de tremp afecten al càlcul del coeficient de transferència de calor durant el procés de tremp: viscositat, calor específica, tensió superficial, densitat, calor latent d'evaporació, i conductivitat tèrmica entre d'altres.

Mitjançant aquestes propietats és possible determinar el coeficient de convecció d'una manera aproximada per a cada fase en els nostres assajos, encara que moltes d'aquestes propietats, especialment per als olis de tremp, són molt difícils de mesurar.

5.3. Anàlisi de les corbes de refredament

5.3.1. Diagrames de transformació

Els aspectes cinètics de les transformacions de fase són tant importants com el diagrama d'equilibri per als tractaments tèrmics dels acers. Generalment una estructura martensítica o bainítica, les quals són d'extrema importància per a les propietats dels acers, es poden formar mitjançant un refredament ràpid fins a la temperatura ambient, o dit d'una altra manera, quan la difusió de carboni i elements d'aliatge es suprimeix o es limita a un rang molt curt.

Mitjançant els diagrames de transformació es pot descriure convenientment que és el que es produeix durant la transformació de l'acer en el tremp. Les velocitats de refredament necessàries per aconseguir algunes microestructures en particular es representen mitjançant els següents diagrames, entre d'altres:

- Diagrama de transformació – temps - temperatura (TTT)
- Diagrama de transformació per refredament continu (CCT)

➤ Diagrama de transformació - temps - temperatura (TTT)

Aquest tipus de diagrama mostra quina estructura assoliria un acer en el cas que es mantingués a una temperatura constant durant un període de temps prolongat. És a dir, mostra d'una manera aproximada les zones a on l'acer patiria l'inici, i el final, de la transformació microestructural.

Les corbes TTT es solen produir austenitzant petites mostres d'acer a la temperatura apropiada per l'acer d'estudi. Després, aquestes mostres es refreden ràpidament per tal d'evitar precipitacions i transformacions no desitjades fins a la isoterma d'assaig,

mantenint-les uns períodes de temps seleccionats a la temperatura d'interès. Quan l'acer pateix una transformació microestructural canvia d'estructura atòmica. El volum de cada una de les estructures (FCC, BCC o BCT) es diferent entre ells, per això, l'acer pateix una dilatació tèrmica. Aquesta dilatació experimentada queda registrada per a cada material, i s'analitza per a posar de manifest la transformació de fase (Figura 5.11).

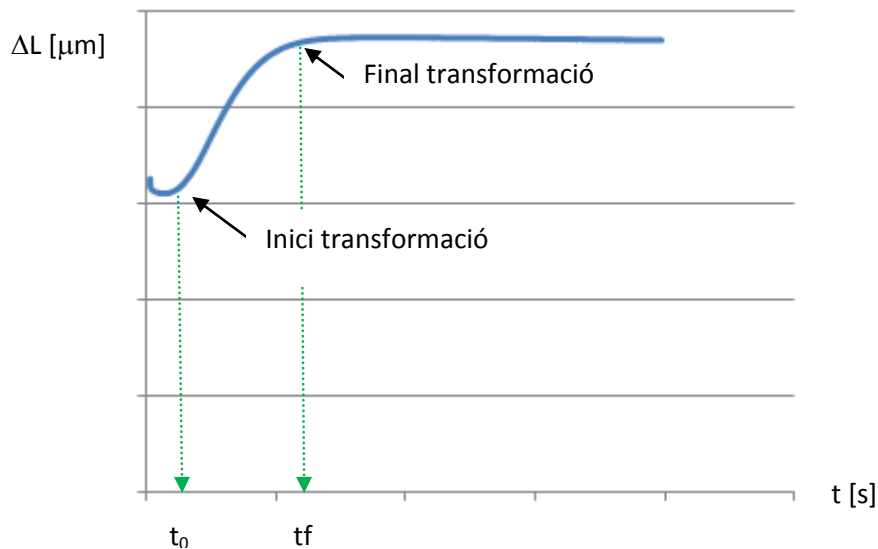


Figura 5-11 Transformació de fase per a un acer a una isoterma d'assaig

El canvi de pendent en la corba és l'encarregat de mostrar en quin punt es dona la transformació de fase per a cada temperatura d'assaig. D'aquesta manera, a una temperatura concreta, quedarà determinat l'inici i final de la transformació pertinent.

El punt d'inici de transformació, en una diagrama TTT, es considera generalment com el temps necessari per produir un 0,1% de transformació a la temperatura específica de manteniment.

Finalment, si es realitza el mateix procediment per a la resta de temperatures quedaran determinades completament tant les corbes de transformació perlítics com bainítics.

A continuació es mostra un exemple de diagrama TTT (Figura 5.12). Les temperatures A_1 i A_3 estan troben indicades.

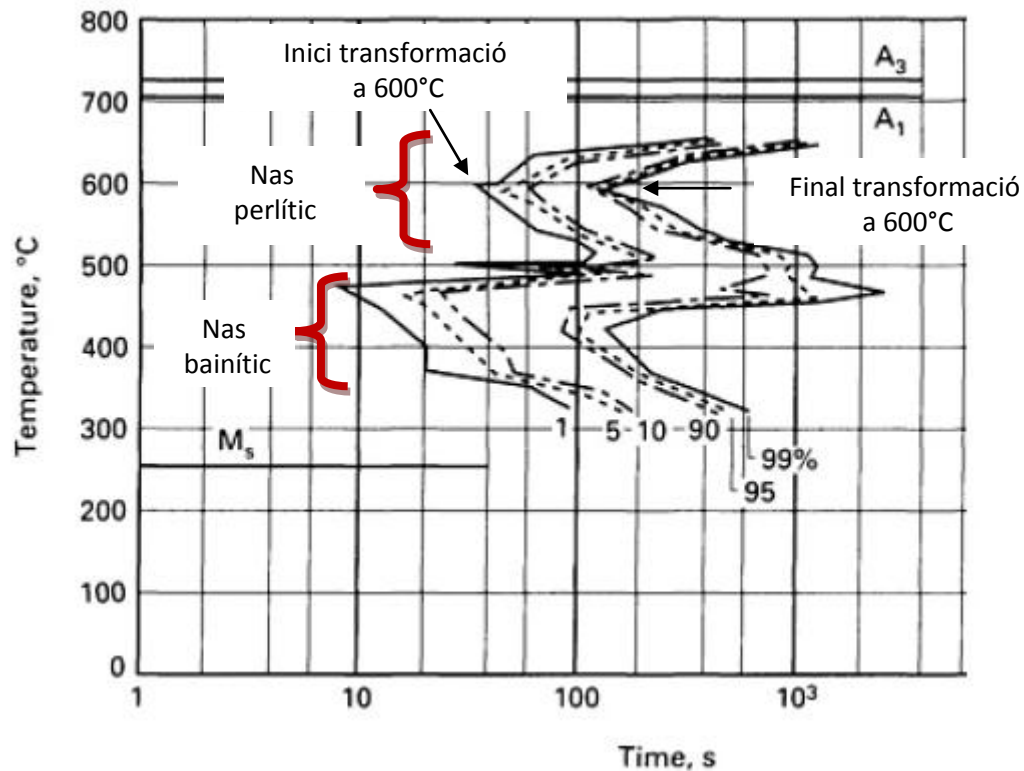


Figura 5-12 Diagrama TTT per a un acer convencional (Font:[1])

Sobre la temperatura **A₃** cap transformació es pot produir. Entre la temperatura **A₁** i **A₃** només es pot formar ferrita. S'ha d'observar que les corbes tenen forma de C, o també denominat nas. Aquesta forma és típica per a les corbes de transformació. A les temperatures més elevades es troba el nas perlític, mentre que a temperatures més baixes trobem el nas bainític. També es pot observar la temperatura d'inici de la transformació martensítica, la qual és independent del temps.

Si la velocitat és tan alta que la corba de refredament no talla en cap punt de la corba del diagrama TTT, s'obté estructura martensítica. Aquesta velocitat es denomina velocitat crítica de tremp (**v_c**), i és la mínima velocitat de refredament requerida per evitar la transformació de la austenita en altres constituents abans d'aconseguir la temperatura **M_s** [6].

➤ Diagrama de transformació per refredament continu (CCT)

Els diagrames CCT es construeixen a partir del refredament de mostres d'acer i examinant les microestructures resultants per determinar les fases associades amb les velocitats de refredament particulars.

Aquests tipus de diagrames s'utilitzen per representar quins tipus de canvis de fase es produirà en un material a mesura que es refreda a diferents velocitats. Generalment, solen ser més útils que els diagrames de temps-temperatura-transformació, ja que és més convenient refredar el material a una certa velocitat a que es refredi ràpidament i es mantingui a una certa temperatura (com és el cas dels diagrames TTT).

En la Figura 5.13 es mostra un exemple de diagrama CCT. Les regions de ferrita, perlita i bainita es troben indicades com també la temperatura martensítica, M_s . Notar que la temperatura martensítica no és constant quan la formació de martensita està precedida per la formació de bainita, però sol disminuir en temps llargs.

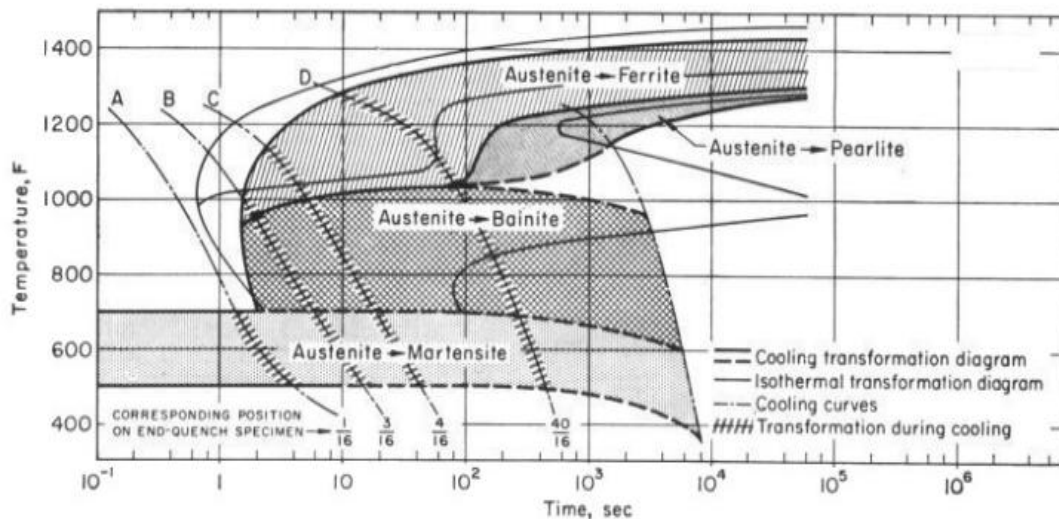


Figura 5-13 Diagrama CCT per a un acer convencional (Font: [11])

La velocitat de refredament i la posició de les corbes CCT depenen del medi de refredament. Per exemple, l'aigua (corba A) produeix la velocitat de refredament més ràpida seguidament de l'oli (corba B) i l'aire (corba D), respectivament.

5.3.2. Medis de refredament per al tremp

Com ja hem esmentat en apartats anteriors, els factors que regeixen el procés de tremp són la temperatura, el temps d'escalfament i la velocitat de refredament. Tradicionalment, la variació de la velocitat de refredament s'ha aconseguit mitjançant la utilització de diferents medis de tremp com l'aigua, olis minerals, olis orgànics, aire, sals i altres.

La velocitat de refredament obtinguda en el tremp determina l'estructura resultant del tractament tèrmic i els valors de duresa i resistència aconseguits. Al refredar a una velocitat superior a la crítica del tremp, la austenita es transforma en martensita. En canvi, si la velocitat es inferior no s'aconseguirà una estructura completament martensítica.

El procés de tremp és un pas crític en la producció d'aliatges d'acer tractables tèrmicament. En molts casos la intensitat de refredament més ràpida possible és necessària per aconseguir les millors propietats del material, però sovint s'utilitzen intensitats de refredament més lentes per minimitzar les tensions residuals que es poden produir durant el procés.

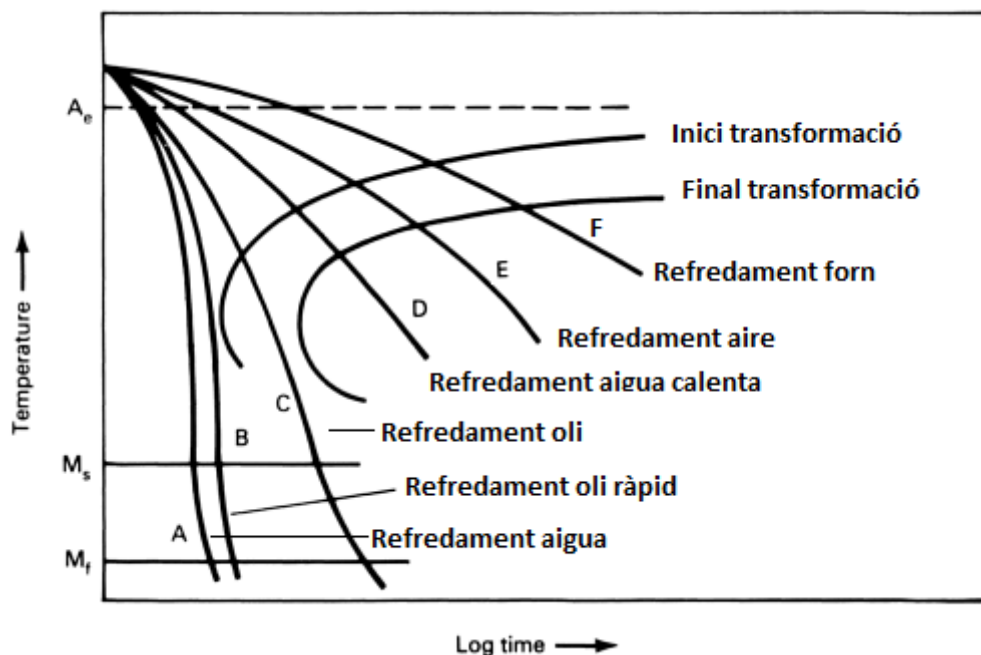


Figura 5-14 Corbes de refredament per a diferents medis (Font: [1])

La Figura 5.14 mostra un diagrama de transformació d'un acer amb les corbes de refredament aconseguides per a diferents medis. Es pot observar, com la corba A de l'aigua és lo suficientment ràpida com per evitar el nas i aconseguir una transformació martensítica completa. L'oli ràpid representat en la corba B, encara que és més lent que l'aigua, també es capaç d'aconseguir una transformació martensítica completa. La resta de corbes, oli convencional, aigua calenta, aire i refredament en el forn, no compleix les característiques anteriors i, per tant, el producte final constarà d'una barreja de fases.

En 1968 Vrugink [1] va avaluar els efectes que produeixen diferents velocitats de refredament en les propietats mecàniques, i va arribar a la conclusió que el mètode més simple i més efectiu era trempar en diferents medis.

En la velocitat de refredament no solament influeix el medi de tremp i la seva temperatura, sinó que també l'estat superficial de la peça d'acer, la seva forma i la seva dimensió [13]. Aquesta velocitat es pot determinar experimentalment mitjançant l'ús de termoparells situats en els punts d'interès de la peça, com per exemple el seu nucli o la seva superfície.

A continuació es mostraran alguns dels factors que poden influir en el poder refrigerant dels líquids destinats al procés de tremp:

- Temperatura inicial del bany : si és molt alta la primera etapa de refredament es perllonga molt.
- Temperatura d'ebullició: si la magnitud és baixa, el refredament serà més lent degut a que es desprendrà molt vapor.
- Calor específic: Ha de ser elevat per a que sigui alta la velocitat de refredament al elevar-se poc la temperatura del bany.
- Conductivitat tèrmica i viscositat: Si la conductivitat tèrmica és alta el refredament es produirà de manera més ràpida. Pel que fa a la viscositat del fluid, com pot ser en el cas del oli, a viscositats menors s'aconseguiran velocitat de refredament majors.

La eficàcia d'un medi de tremp es pot comprovar, per exemple, al trempar una peça cilíndrica de l'acer d'interès i analitzar la influència en la estructura de la superfície i el centre.

Per a obtenir en el tremp dels acers els millors resultats convé utilitzar el medi de refredament menys energètic que sigui capaç de comunicar a l'acer una velocitat de refredament superior a la crítica. D'aquesta manera s'aconsegueix una estructura completament martensítica, la màxima duresa compatible amb la seva composició i s'eviten en lo possible les esquerdes i deformacions.

5.3.3. Interpretació de les corbes de refredament

El camí més útil per a realitzar una estudi precís que descrigui el complex mecanisme del tremp és elaborar una corba de refredament sobre el medi d'estudi sota condicions controlades [21]. L'anàlisi de les corbes de refredament presenta molta eficàcia a l'hora d'estudiar diferents medis de tremp, degut a que aquestes corbes il·lustren els mecanismes de refredament involucrats en el procés en un ampli interval de temperatures. A més a més, l'estudi de les corbes de refredament ens pot proporcionar de manera quantitativa el valor del coeficient de transferència de calor com a funció de la temperatura.

Avui en dia, està reconegut generalment que la corba que mostra la velocitat de refredament, la qual és la primera derivada de les dades de temperatura-temps respecte el temps, proporciona més informació en comparació amb la corba de refredament temperatura-temps [1].

Habitualment les característiques d'eliminació de calor per a qualsevol medi de tremp són estudiades a partir d'una proveta d'estudi per assajos. La configuració d'aquesta proveta és una barra cilíndrica amb una longitud al menys quatre vegades el seu diàmetre per tal de minimitzar els efectes de refredament finals [1, 15]. Un termoparell es situa al centre geomètric de la proveta per tal de registrar les temperatures en front del temps. En alguns altres estudis, es interessant la col·locació d'un altre termoparell en la superfície de la peça. Així, es possible tenir coneixement sobre l'evolució de la temperatura a través de la peça d'estudi durant el tremp. La

Figura 5.15 mostra dues representacions de les dades adquirides per a representar la corba de refredament:

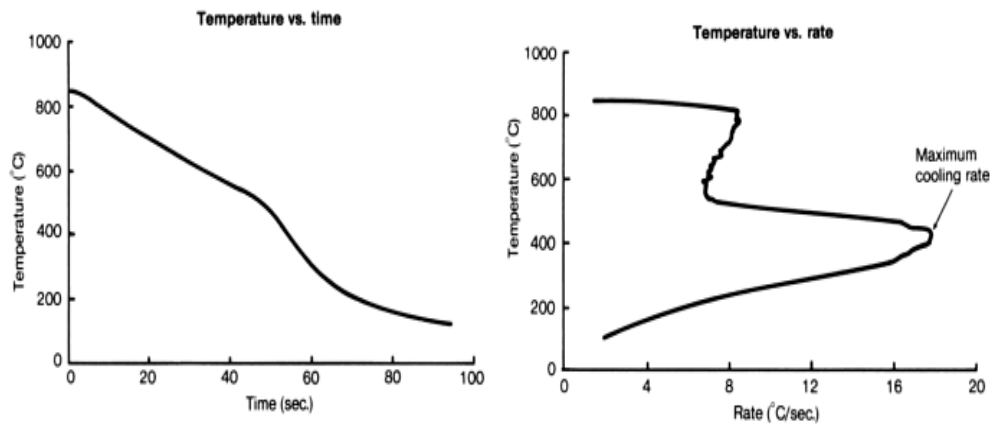


Figura 5-15 a) Representació general de la corba de refredament per a tremp en un líquid b) Representació general de la velocitat de refredament per a tremp en un líquid (Font: [1])

Els paràmetres més comuns que s'obtenen de les corbes de refredament són la màxima velocitat de refredament ($v_{m\grave{a}x}$), juntament amb la temperatura a la que es produeix ($T_{m\grave{a}x}$), i la velocitat de refredament sobre els 300°C (v_{300}). Normalment, és desitjable que la $v_{m\grave{a}x}$ es produeixi a temperatures elevades, més específicament a la regió de la transformació perlítica i ferrítica per tal de minimitzar la formació d'aquest components i aconseguir la màxima duresa. En canvi, les velocitats de refredament a la regió on s'inicia la formació de martensita, M_s , hauria de minimitzar-se per reduir la possibilitat de produir esquerdes i distorsió al material [1,3]. Les corbes de refredament també poden ser interpretades en comparació amb els diagrames de transformació TTT o CCT. D'aquesta manera es pot observar d'una manera més visual si la velocitat de refredament obtinguda supera la velocitat de refredament crítica (Figura 5.16).

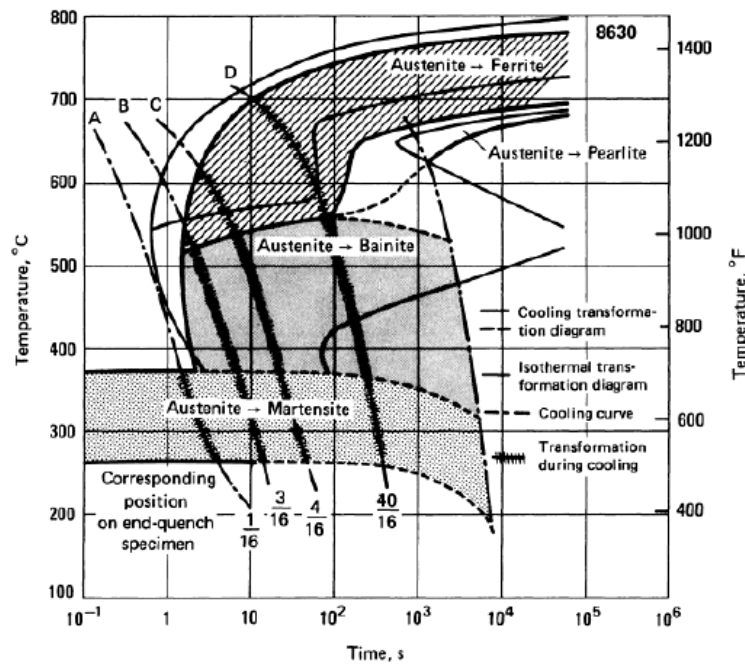


Figura 5-16 Diagrama de transformació i corbes de refredament per a l'acer 8630. A la representació s'indica la transformació de l'austenita en altres constituents en funció de la velocitat de refredament (Font: [1])

Tot i que $v_{m\grave{a}x}$ i v_{300} proporcionen informació sobre el tremp de molt interès, sovint és desitjable un estudi més extens de les corbes de refredament. Tensi (1985) [3] va proposar un conjunt de paràmetres addicionals per tal de realitzar una quantificació completa del procés de refredament (Figura 5.17). Aquest valors suggerits són:

- Temps (t_u), temperatura (T_u), i velocitat de refredament (T_{DHmin}) de la transició de la primera etapa de refredament (ebullició de pel·lícula) a la segona (ebullició nucleada).
- Velocitat de refredament màxima ($v_{m\grave{a}x}$) i temperatura ($T_{m\grave{a}x}$) a la que es produeix.
- Velocitats de refredament a unes determinades temperatures quan es produeix la tercera etapa de refredament (etapa de convecció). Com per exemple 300°C (v_{300}) o 200°C (v_{200}) [3].

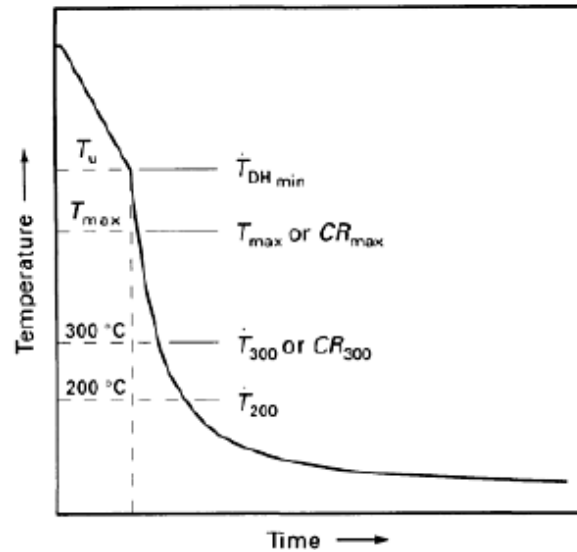


Figura 5-17 Paràmetres crítics per a la corba de refredament en un tremp (Font: [1])

5.4. Influència dels paràmetres de tremp

Les corbes de refredament són sensibles a alguns factors que afecten la habilitat dels medis de tremp per a extreure calor, a part de la configuració de la peça que es vol tractar tèrmicament també hi ha altres factors que poden influir, com ara el tipus de medi utilitzat i les seves propietats físiques, la temperatura del bany i l'agitació.

5.4.1. Tipus de medi

La finalitat del medi de tremp és controlar la transmissió de calor que pateix la peça d'acer que es troba a temperatura d'austenització un cop s'inicia el refredament. La elecció del medi de tremp és un paràmetre clau, ja que d'ell dependrà la velocitat de refredament. Com ja hem vist en apartats anteriors, són molts els medis de tremp que es poden utilitzar per a refredar un material d'acer. Les intensitats de refredament més elevades les podem trobar utilitzant aigua o salmorra (solució d'aigua amb sal). En canvi, per aconseguir unes intensitats de refredament més baixes hauríem d'utilitzar oli, sals o solucions de polímers. Finalment, les velocitats més baixes de refredament s'aconsegueixen amb l'aire, atmosferes de gas inert o en buit [3,13].

- Aigua

Per tal d'evitar una prolongació de la primera etapa del refredament, s'ha d'evitar que l'aigua s'escalfi durant el tremp. L'aigua refreda molt ràpidament la superfície, com a

conseqüència es forma una escorça molt dura i es creen tensions internes perilloses que poden deformar o trencar les peces [13].

Afegint a l'aigua una determinada quantitat de sals, com per exemple clorur de sodi, el refredament és més ràpid i per tant més energètic, ja que és major el calor específic de les solucions respecte a l'aigua pura. Això es degut a que l'addició de sal eleva el seu punt d'ebullició. Des de un punt de vista molecular, quan s'eleva la temperatura de l'aigua, les molècules es mouen més ràpidament, xoquen amb més freqüència, i alliberen més molècules de gas de vapor. Els ions de sal química agafen una mica d'espai, fent menys col·lisions entre les molècules d'aigua, per tant, no s'alliberen tantes molècules de vapor com ho faria l'aigua pura. És a dir, es requereix més energia (una temperatura més elevada) per a que l'aigua salada comenci a bullir. Per a una addició de 58 grams de sal dissolta en 1 litre d'aigua, la temperatura d'ebullició es veu incrementada en 1°C [26, 27].

També cal esmentar la existència d'una proporció de sal en l'aigua que fa que es comporti com si fos una substància pura, tècnicament és qualifica com "eutèctic", que en el cas de la sal és un 23% de sal en massa. La finalitat és aconseguir un descens crioscòpic, o dit d'una altra manera, una reducció del seu punt de fusió que s'aconsegueix per la presència de soluts. Al diagrama de fases (Figura 5.18) es pot observar com disminueix la temperatura de fusió al afegir una determinada quantitat de sal a l'aigua, aconseguint amb una proporció del 23% de sal en massa la màxima temperatura de congelació, -21°C [14].

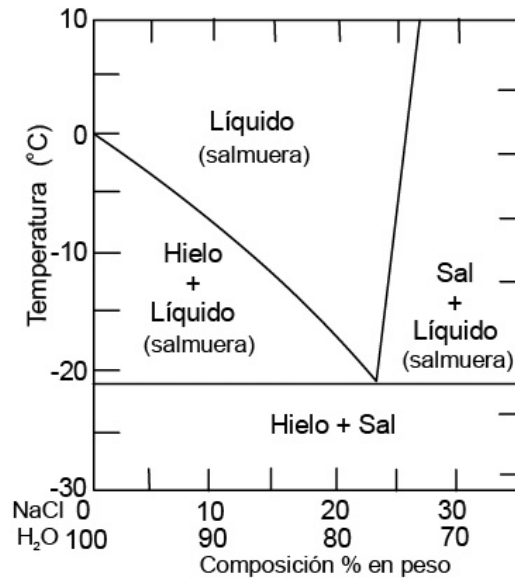


Figura 5-18 Diagrama de fases per a la salmorra que representa la temperatura de fusió en funció de les proporcions de sal-aigua (Font: [14])

L'addició de sal en l'aigua també ens ajuda disminuir la primera etapa de refredament o ebullició de pel·lícula, això és degut a que durant el procés d'evaporació les solucions salines cristal·litzen i els seus cristalls, donat les altes temperatures en la que ens trobem, esclaten trencant la capa de vapor que envolta la peça.

• Oli

Normalment, s'utilitzen quasi exclusivament els olis minerals. El calor específic, punt d'ebullició, calor d'evaporació, conductivitat tèrmica i viscositat, presenten un paper molt important. Un oli de tremp sol tenir una temperatura d'ebullició compresa entre 230°C i 480°C. D'altra banda, un augment de la viscositat sol anar acompanyat d'una elevació del punt d'ebullició i disminueix el temps de la fase vapor, però suavitza les condicions de la fase de convecció. Si la viscositat és excessiva, disminuirà la turbulència que contribueix a l'extracció de calor en la fase d'ebullició i empitjoraran les condicions de tremp [8,20].

L'oli calent té més poder refrigerant que el fred, degut a que presenta una viscositat menor i és més fluid. Aquest tipus de medi produeix deformacions i tensions internes notablement inferiors a les del aigua i/o solucions salines. Un bon oli per a tremp ha de

tenir una volatilitat no molt elevada, una temperatura de inflamació i combustió lo més alta possible, i gran resistència a l'oxidació [13].

5.4.2. Temperatura del medi de tremp

Òbviament, la temperatura a la que disposem el bany afectarà a la habilitat del medi per a extreure la calor. No obstant, no és sempre veritat que una temperatura de medi més baixa proporcioni una extracció de calor més ràpida. L'aigua perd la seva potència de refrigeració a mesura que s'apropa al seu punt d'ebullició, però aquest no és el cas per a l'oli, el qual a temperatures més elevades és menys viscos. A menys viscositat més favorable és la turbulència que contribueix a l'extracció de calor, és a dir, més altes són les velocitats de refredament [3,12,13].

5.4.3. Agitació

L'agitació es refereix al moviment del fluid entorn del material d'acer que estem tractant. Normalment l'agitació s'aconsegueix remenant el líquid, però altres vegades s'aconsegueix movent el component d'acer dins del líquid.

L'agitació és el paràmetre que més afecta en el procés de tremp, i per tant, en la transmissió de calor. Això és degut a que l'agitació provoca un trencament de la capa de vapor en la primera etapa de refredament o d'ebullició de pel·lícula, i com a conseqüència, accelera la transició d'aquesta primera etapa fins a la segona o etapa d'ebullició nucleada. Un augment de l'agitació produeix un escurçament en quant a temps de la primera etapa i unes velocitats de refredament més ràpides en totes tres etapes de refredament [1].

Si l'agitació no és produïda durant les etapes de refredament és pot provocar un refredament no uniforme, degut a la possible existència de punts calents causat per una eliminació de calor desigual.

5.5. Evolució tèrmica de l'acer

Durant el procés de tremp s'altera la temperatura superficial del nostre material d'estudi, per tant, la temperatura en cada punt del material també començarà a variar. Aquests canvis de temperatura es continuaran produint fins que s'arribi a un distribució de temperatures d'estat estable. És a dir, estem davant d'un tipus de

procés a on la transferència de calor depèn del temps, o dit d'una altra manera, en un procés transitori o no estable.

En molts processos industrials de refredament, com és el cas del tremp, les peces metàl·liques es treuen calentes del forn i es refreden en el fluid que més convé. L'energia es transfereix per convecció i radiació des de la superfície del material als voltants. En canvi, des de l'interior de la peça metàl·lica l'energia es transfereix per conducció fins a la seva superfície, per tant, la temperatura en cada punt del metall disminueix fins aconseguir una condició d'estat estable.

No obstant, existeixen casos en els que els gradients de temperatura dins del sòlid són petits i ens permet utilitzar un mètode més senzill, denominat *resistència interna despreciable*.

5.5.1. Mètode de la resistència interna despreciable

L'elaboració d'aquest capítol s'ha elaborat a partir del capítol 5 del llibre *Fundamentals of Heat and Mass Transfer (6th Edition)* de l'autor FRANK P. INCROPERA.

Quan una peça de metall calent, que inicialment es troba a temperatura uniforme T_0 , es trempa per immersió en un líquid a temperatura més baixa $T_\infty < T_0$ (Figura 5.19), el procés de refredament s'inicia en el temps $t = 0$, i la temperatura del sòlid disminueix en el temps $t > 0$ fins que arribi a T_∞ .

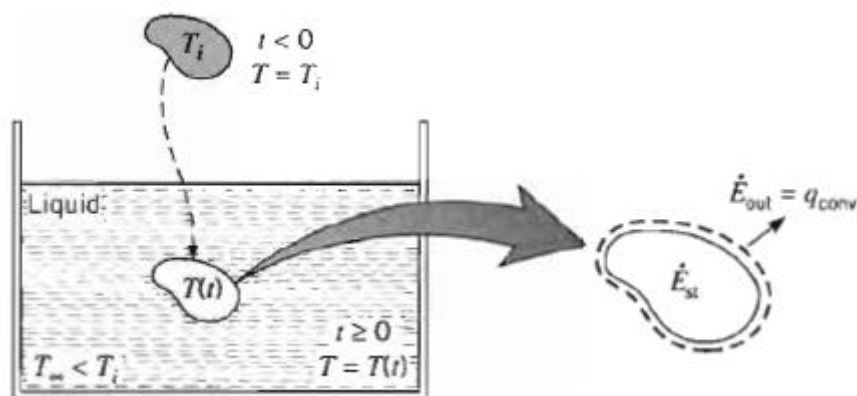


Figura 5-19 Refredament, per tremp en un líquid, d'una peça d'acer calent (Font: [16])

En aquest tipus de problemes transitoris la calor es transfereix per conducció dins del propi cos de la peça, i mitjançant el fenomen de la convecció entre la superfície i el

fluid que es troba al voltant del material. Si la resistència tèrmica del cos és més petita comparada amb la del fluid, es pot estimar que la temperatura dins del cos es manté uniforme al llarg del procés (els gradients de temperatura interns es poden negligir).

Seguidament es mostra l'equació del balanç d'energia amb aquesta estimació aplicada (Equació 5.12) [3, 16]:

$$-\dot{E}_{sortida} = \dot{E}_{alm} \quad \text{Equació 5.12}$$

on:

$\dot{E}_{sortida}$ = L'energia tèrmica transferida entre la peça i el fluid que es troba al voltant.
L'equació que mostra aquest procés és la següent (Equació 5.13):

$$\dot{E}_{sortida} = h \cdot A_s \cdot (T_s - T_\infty) \quad \text{Equació 5.13}$$

\dot{E}_{alm} = L'energia tèrmica emmagatzemada en el sòlid. La equació que mostra aquest mecanisme és la següent (Equació 5.14):

$$\dot{E}_{alm} = \rho \cdot V \cdot C_p(T) \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) \quad \text{Equació 5.14}$$

Si introduïm l'Equació 5.13 i l'Equació 5.14 en l'Equació 5.12, obtenim:

$$-h \cdot A_s \cdot (T_s - T_\infty) = \rho \cdot V \cdot C_p(T) \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) \quad \text{Equació 5.15}$$

a on:

h = Coeficient de convecció entre el sòlid i el fluid que es troba en contacte al voltant
[W/m²·°C]

A_s = Superfície del sòlid en contacte amb el fluid [m²]

T_s = Temperatura de la superfície del material [°C]

T_∞ = Temperatura del fluid [°C]

ρ = Densitat del material [kg/m³]

V = Volum del sòlid [m^3]

$C_p(T)$ = Calor específica del material [$J/kg \cdot ^\circ C$]

$\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)$ = Derivada de la temperatura respecte el temps

5.5.2. Validesa del mètode de la resistència interna despreciable

La senzillesa del mètode de la resistència interna despreciable fa que es presenti com un dels mètodes preferents per a la resolució de problemes de conducció transitoria. No obstant, és important determinar en quines condicions es pot utilitzar aquest mètode de manera raonable.

En problemes de conducció que s'impliquen efectes de convecció superficial, el nombre de Biot desenvolupa un paper fonamental. El nombre de Biot mostra la relació entre la resistència interna (conducció) i la resistència externa (convecció) del sòlid que està transferint calor amb el fluid. És un paràmetre adimensional, el qual proporciona una mesura de la caiguda de temperatura en el sòlid en relació amb la diferència de temperatures entre la superfície i el fluid [3,16]. Seguidament es mostra com és la seva equació (Equació 5.16):

$$Bi = \frac{R_{cond}}{R_{conv}} = \frac{h \left(\frac{V}{A_s} \right)}{k} = \frac{h \cdot L_c}{k} \quad \text{Equació 5.16}$$

on:

h = Coeficient de convecció [$W/m^2 \cdot ^\circ C$]

V = Volum del sòlid [m^3]

A_s = Superfície del sòlid en contacte amb el fluid [m^2]

k = Conductivitat tèrmica del sòlid [$W/m \cdot ^\circ C$]

L_c = Longitud característica del sòlid [m]

Quan la resistència interna és negligible, o quan la conductància externa és gran, $k/L_c \rightarrow \infty$ i $Bi \rightarrow 0$, la resistència a la conducció dintre del sòlid és molt menor que la resistència a la convecció a través de la capa límit del fluid [16]. En conseqüència, el mètode de la resistència interna despreciable serà vàlid quan el nombre de Biot (Bi) és menor o igual que 0,1 (Equació 5.17).

$$Bi = \frac{h \cdot L_c}{k} = 0,1 \quad \text{Equació 5.17}$$

5.5.3. Càlcul del coeficient de transferència de calor

El càlcul del coeficient de transferència de calor per convecció és molt crític per entendre el poder d'extracció de calor de diferents medis de tremp. Generalment hi ha tres modes de transferència de calor: conducció, convecció i radiació. En el present projecte el mètode de la resistència interna despreciable és vàlid, per tant, es considera que la transmissió de calor es dona mitjançant el fenomen de la convecció.

Aïllant de l'equació 5.15 el paràmetre h, obtenim una nova equació que ens permet el càlcul del coeficient de convecció de manera directa (Equació 5.18):

$$h = \frac{\rho \cdot V \cdot C_p(T) \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)}{A_s \cdot (T_s - T_\infty)} \quad \text{Equació 5.18}$$

Per a provetes cilíndriques,

$$\frac{V}{A} = \frac{\pi \cdot r^2 \cdot H}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot H} = \frac{r}{2} \quad \text{Equació 5.19}$$

A on,

H = alçada de la proveta cilíndrica [mm]

r = radi de la proveta cilíndrica [mm]

Per al càlcul del coeficient de transmissió de calor mitjançant l'Equació 5.18, ρ , V/A , i T_∞ són constants i sabem quin és el seu valor, ja que són propietats físiques de l'acer i del medi de refredament. En canvi, T i $\delta T/\delta t$ són variables que varien amb el temps i s'han de determinar experimentalment mitjançant el registrament de les dades

utilitzant un termoparell situat en el centre de la proveta. Un cop tenim les dades registrades es pot calcular la velocitat de refredament que s'ha aconseguit en l'assaig en cada instant.

No obstant, hi ha dos paràmetres que dificulten el càlcul del coeficient de convecció degut a que s'alteren amb la temperatura al llarg del procés. Aquest paràmetres són: calor específica de l'acer i conductivitat tèrmica de l'acer. El seu coneixement és fonamental per tal de poder determinar quin és el coeficient de transferència de calor que comanda el procés. Durant l'elaboració del projecte, aquests paràmetres es van determinar mitjançant l'ús d'un conductímetre, tal com es veurà en el capítol 6 a l'apartat 6.3.2.

5.5.4. Efectes multidimensionals

Els efectes espacials s'han de tenir en compte en aquelles situacions on el mètode de la resistència interna despreciable no sigui apropiat. Degut a que els gradients de temperatura dins del sòlid ja no es poden menysprear i influeixen en la seva transmissió de calor.

Per a aquests casos és útil l'utilització d'un altre mètode de càlcul anomenat: mètode de separació de variables. El qual serà necessari per a la predicció de les corbes de refredament per a peces més grans en el present treball.

Per a un bloc d'acer amb una geomètrica cúbica, el capítol 3 del llibre *Fundamentals of Heat and Mass Transfer (6th Edition)* de l'autor FRANK P. INCROPERA, ens dona l'equació que regeix la seva transferència de calor, la qual segueix la següent forma:

$$\frac{T(x_1, x_2, x_3) - T_\infty}{T_i - T_\infty} = P(x_1, t) \cdot P(x_2, t) \cdot P(x_3, t) \quad \text{Equació 5.20}$$

Tal com es pot observar en l'Equació 5.20, l'equació per a un sòlid que presenta una transferència de calor al llarg de tres dimensions, es planteja como el producte de tres solucions unidimensionals en un paret plana. Aquests termes unidimensionals, $P(x_i, t)$, es resolen mitjançant la següent expressió (Equació 5.21):

$$P(x_i, t) = \frac{T(x_i, t) - T_{\infty}}{T_s - T_{\infty}} = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cdot \exp(-\xi_n^2 \cdot Fo) \cos(\xi_n \cdot x^*) \quad \text{Equació 5.21}$$

a on:

$$Fo = \frac{\alpha \cdot t}{L^2} \quad \text{Equació 5.22}$$

$$C_n = \frac{4 \cdot \sin(\xi_n)}{2 \cdot \xi_n + \sin(2 \cdot \xi_n)} \quad \text{Equació 5.23}$$

α = difusivitat tèrmica del sòlid, [m²/s]

t = temps, [s]

L = longitud característica, [m]

ξ = coeficients eigenvalors

Per a l'Equació 5.23, els coeficients eigenvalors, ξ_n , s'obtenen mitjançant el nombre de Biot, i els seus valor venen donats en la Taula A.1 de l'Annex A.

Finalment, resolent l'Equació 5.21 per a les tres direccions dimensionals, i mitjançant l'Equació 5.20, serà possible la determinació de l'evolució de la temperatura en qualsevol punt de la peça.

6. PROCEDIMENT EXPERIMENTAL

En aquest capítol es descriuen els mètodes d'assaig utilitzats tant en la primera part, on els assajos serveixen per caracteritzar diferents medis de tremp, com en el nostre cas d'estudi (segona part), on es porten aquest assajos realitzats anteriorment a una escala més gran.

6.1. Introducció

Tal com s'ha comentat en apartats anteriors, quan es vol que un acer augmenti de duresa, l'etapa més crítica es troba en el procés de tremp. Per a realitzar el refredament, la persona encarregada s'ha d'assegurar que el medi utilitzat tingui les característiques de refredament idònies per dur a terme el tremp.

Per a la primera part de l'estudi existeixen un gran nombre de mètodes per a avaluar el medi de refredament. El mètode més comú, per a realitzar l'assaig de manera directa, és l'anomenat mètode de l'esfera de plata. En aquest cas, la proveta d'assaig és una esfera de plata, la qual s'escalfa en un forn i es refreda ràpidament en el fluid d'estudi amb un termoparell situat en el seu centre geomètric. La temperatura es registra en funció del temps, com també es registra la velocitat de refredament en cada instant de temps o temperatura.

Avui en dia, degut a les dificultats tècniques presents per a la realització de la proveta esfèrica, les provetes d'assaig es solen construir en forma cilíndrica.

Per tal de poder realitzar comparacions entre diferents estudis que es realitzaran en el present projecte (primera part), és necessari l'aplicació d'un mètode estàndard per a realitzar els assajos. És per això, que els assajos realitzats pel registrament de dades en aquest treball s'ha adaptat, intentat realitzar-ho de la manera més similar possible, al mètode proposat per *l'International Organization for Standardization (ISO)*. Més específicament, el mètode emprat és la **ISO 9950 – Industrial quenching oils – Determination of cooling characteristics – Nickel-alloy probe test method**.

6.2. Abast del procediment experimental

En aquest sisè capítol, es descriu el disseny de la proveta per als 3 acers per a eines que s'estudiaran, i el sistema de tremp emprat per a generar les dades necessàries per al càlcul de les velocitats de refredament i coeficient de transferència de calor.

Cal esmentar que el procediment descrit per la **ISO 9950**, s'utilitza per a caracteritzar olis com a medi de tremp. En aquest treball però, també s'utilitzarà per caracteritzar l'aigua salada. El test es realitza sense agitació, que com ja hem vist anteriorment presenta una gran influència en l'acceleració del procés de refredament.

Per cada material es fabrica un total de 2 provetes. Al seu centre geomètric es situa un termoparell que registra l'escalfament que pateix la proveta a l'hora d'introduir-la en un forn que l'escalfa fins a la temperatura d'assaig. Finalment, la proveta es transferida a un volum fix de fluid de refredament. El canvi de temperatura en el nucli de les provetes es registra en funció del temps. En canvi, les velocitats de refredament es determinaran més tard mitjançant el tractament de les dades obtingudes.

Pel que fa al nostre cas d'estudi (segona part), es tremparan blocs per a l'acer A i es registrarà la temperatura per a diferents punts estratègics del bloc (superfície, punt intermig i nucli). Així serem capaços d'observar la diferència de velocitats de refredament que pateix el bloc al llarg de la seva geometria.

6.3. Primera part – Assajos segons normativa ISO

6.3.1. Material

➤ Recipient

El fluid de tremp ha d'estar contingut en un recipient prèviament netejat i assecat, amb un diàmetre de 115mm (+/-) 5mm i capacitat de 2 litres (Figura 6.1). Preferiblement ha de ser d'un material irrompible que pugui suportar altes temperatures.



Figura 6-1 Recipient d'assaig amb mostra d'oli

➤ Fluids d'assaig

L'experimentació es donarà a terme en diferents medis de tremp a diferents temperatures. Els fluids a caracteritzar són l'aigua salada i l'oli, i el volum total necessari és de dos litres.

Les temperatures d'estudi, per a cada líquid, són: temperatura ambient i 80°C.

➤ Proveta d'assaig

Es realitzaran 2 provetes d'assaig per a cada material d'estudi (A, B i C), en un total de 6 provetes per assajar. Al seu centre geomètric es situa un termoparell per al registrament de dades, muntat sobre un suport fabricat del material A (Figura 6.2).

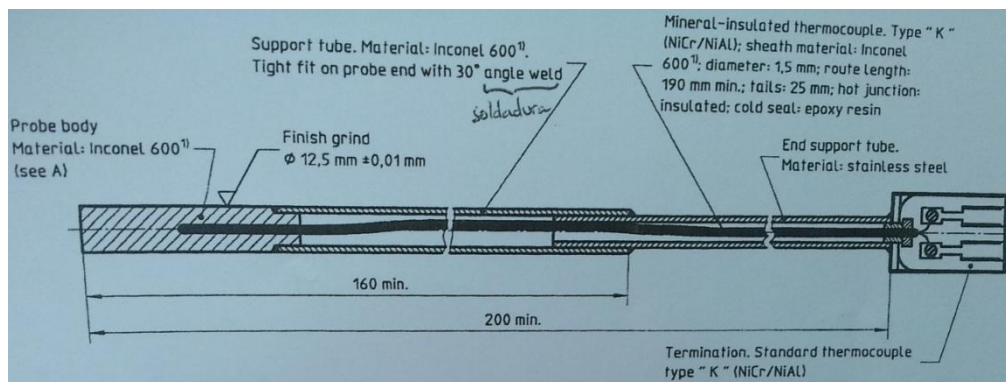


Figura 6-2 Proveta i suport amb el termoparell en el centre geomètric de la proveta
(Font: [15])

Les provetes tenen forma cilíndrica amb un diàmetre de 12,5 mm i una longitud de 60 mm (Figura 6.3).

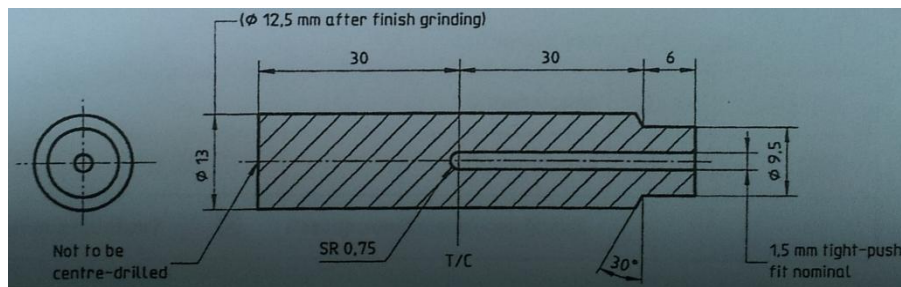


Figura 6-3 Plànol de la proveta a assajar (Font: [15])

A les provetes se'ls hi mecanitza una rosca en la part superior per tal de poder enroscar les provetes al suport del termoparell (Figura 6.4).



Figura 6-4 Provetes a assajar per als materials A, B i C

➤ Termoparell

Segons la normativa ISO, la temperatura de la proveta s'ha de mesurar mitjançant un termoparell tipus-K, amb un diàmetre exterior de 1,5 mm i disposar d'un recobriment de material Inconel 600. A més a més, ha de tenir un temps de mostreig suficientment curt com per registrar els canvis de temperatura durant el procés.

Per aquest projecte, el termoparell té un rang de treball de -40°C a 1200°C , i una sensibilitat de $41\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ aproximadament.

➤ Suport del termoparell

El tub que suporta el termoparell es fabrica del mateix material que la proveta A, i té un diàmetre exterior de 12,5 mm i 100 mm de longitud. Mitjançant la rosca

mecanitzada en l'extrem del suport, i de les provetes, es pot utilitzar el mateix suport per a tots els assajos (Figura 6.5).



Figura 6-5 Probeta enroscada al suport dins del forn

➤ Forn

El forn utilitza varies resistències per tal d'escalfar les provetes d'estudi a la temperatura d'assaig. Aquest ha de ser capaç de mantenir la temperatura d'assaig, i proporcionar a la proveta una temperatura uniforme, és a dir, que la temperatura de la proveta no variï més de 2,5°C en la seva longitud.

També és necessari la utilització d'un forn auxiliar per a escalfar els medis de tremp (aigua salada i oli), per a la realització dels assajos a temperatura de 80°C. Aquest forn en qüestió, presenta unes dimensions majors que els utilitzats per a l'escalfament de les provetes, i el seu escalfament es dona a terme mitjançant resistències.

➤ Sistema d'adquisició de dades o Datalogger

L'adquisició de dades és un procés fonamental per tal de definir una corba de refredament i poder realitzar el seu posterior estudi. Antigament, s'utilitzaven aparells d'adquisició de dades com ara l'oscil·lògraf. No obstant, aquest aparell és molt difícil de calibrar i l'anàlisi de les corbes de refredament no és tan precís. Avui en dia es poden adquirir suficients dades del procés de refredament mitjançant ordinadors equipats amb un registrador de dades o *datalogger*. El *datalogger* és un dispositiu elèctric encarregat del registrament de dades en funció del temps, que et permet

escollir de manera molt senzilla la freqüència de mostreig a la que vols realitzar el control del procés. En aquest projecte per a la realització dels assajos de tremp, s'utilitza un datalogger DATAQ DI-718-ES juntament amb un ordinador (Figura 6.6) per a l'adquisició de les dades de temperatura-temps del termoparell situat dins de la proveta.



Figura 6-6 Datalogger DATAQ DI-718-ES en connexió amb l'ordinador

El termoparell es troba connectat a la caixa de connexió, el qual es connecta directament a l'ordinador. Aquest datalogger és capaç d'incorporar un màxim de 8 connexions amb els termoparells, i té un freqüència de mostreig de 0,05 segons.

6.3.2. Determinació de les propietats físiques del material

En el següent apartat es dedica a explicar com es calcula la calor específica i la conductivitat del nostre material d'estudi en el present projecte, i quines estimacions es prenen per a futurs càlculs.

Avui en dia, hi ha moltes situacions de disseny o modelització de processos en els que seria de gran utilitat el coneixement de la calor específica i conductivitat de tèrmica del material que es realitzarà l'estudi. És per això, que és necessari determinar la evolució d'aquest paràmetres en funció de la temperatura.

La conductivitat tèrmica controla la magnitud dels gradients de temperatura que ocorren en els materials durant la seva fabricació o ús. Durant el tractament tèrmic la conductivitat limita la mida dels components que es poden arribar a produir amb la microestructura desitjada, ja que la transformació depèn en gran mesura de la velocitat de refredament i la temperatura [17].

En canvi, la calor específica del material és una propietat física del material que es defineix com la quantitat d'energia calorífica que un material ha de absorbir per tal d'augmentar en una grau la seva temperatura.

En aquest projecte, ambdós paràmetres es determinen experimentalment a partir de l'utilització d'un equip de conductivitat tèrmica LFA 457/2/G Micro Flash™. El conductímetre ens permet realitzar una sèrie d'assajos durant un interval de temperatures per a cada material d'estudi. D'aquesta manera es pot determinar aproximadament quina és la conductivitat tèrmica i calor específica que presenta el material a les temperatures d'assaig (25°C, 200°C, 400°C, 600°C, 800°C i 900°C).

A l'Annex B s'explica detalladament el procediment per a la realització de les provetes de conductivitat.

NOTA: Els resultats obtinguts durant la realització d'aquest assajos es prenen com a valors aproximats per a cada temperatura d'assaig. El conductímetre escalfa la mostra a una determinada velocitat i calcula aproximadament quin és el valor de conductivitat i calor específica en aquella temperatura, i per a aquella estructura inicial de recuit. Una estructura de recuit correspon a un material al que no se li ha realitzat cap tractament tèrmic.

En aquest projecte es considera que aquesta evolució de k i C_p en funció de la temperatura es manté a l'hora de realitzar el tractament tèrmic de tremp (refredament).

- Conductivitat tèrmica de l'acer

En els material metàl·lics els electrons proporcionen una contribució addicional a la conductivitat tèrmica, i per tant, el seu valor pot ser molt més gran que en els material no-metàl·lics en els quals només contribueixen els fonons. La interacció entre els fonons i els electrons determinen la conductivitat tèrmica en un metall pur. En els aliatges, els elements d'aliatge causen unes alteracions similars.

La conductivitat tèrmica és el fenomen en el qual la calor es transportada des de regions d'altres temperatures a regions temperatures més baixes en la pròpia substància. És a dir, ens mesura la velocitat a la qual un material es capaç de transmetre calor. Segons un estudi realitzat per M.J. Peet, H.S. Hasan i H.K.D.H. Bhadeshia, la màxima conductivitat tèrmica en els acers s'aconsegueix a temperatures criogèniques. A més a més, degut a les interaccions dels fonons la conductivitat tèrmica s'espera que disminueixi a mesura que s'augmenta la temperatura (Figura 6.7) [17].

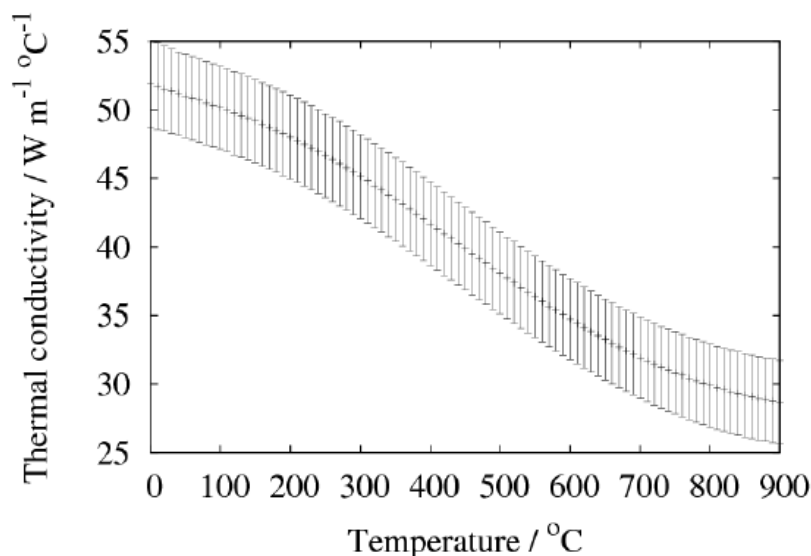


Figura 6-7 Evolució general de la conductivitat tèrmica d'un acer en front de la temperatura (Font: [3])

L'historial de temperatura i la mateixa temperatura a la que es troba un acer té una gran influència en la conductivitat tèrmica. Sense canviar la composició, en un acer es poden aconseguir un gran nombre de diferents microestructures segons el tractament tèrmic aplicat.

La conductivitat tèrmica per a un aliatge dependrà fortament de la temperatura i la seva microestructura, i conseqüentment del temps. A continuació es mostra gràficament l'evolució de la conductivitat tèrmica obtinguda amb el conductímetre LFA 457/2/G Micro FlashTM per a cada material d'estudi (Figura 6.8):

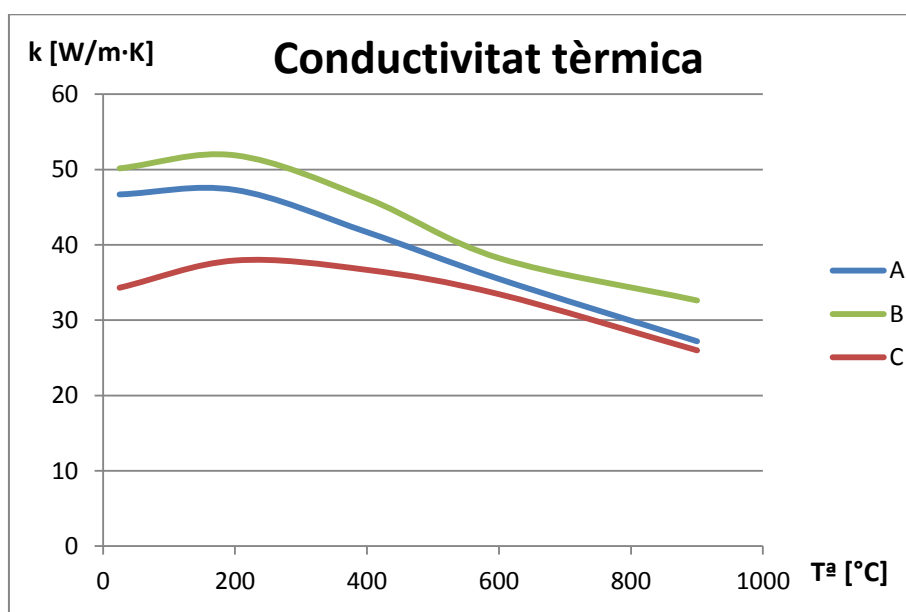


Figura 6-8 Evolució de la conductivitat tèrmica en front de la temperatura per als materials d'estudi

A continuació es mostra una taula amb les equacions que descriuen aquestes corbes i el seu valor de coeficient de determinació (R^2) en el gràfic (Taula 6.1).

A	k_A [W/m·K]	$y = 6E-08x^3 - 0,0001x^2 + 0,0212x + 46,339$ $R^2 = 0,9983$
B	k_B [W/m·K]	$y = -1E-05x^2 - 0,0112x + 52,022$ $R^2 = 0,9369$
C	k_C [W/m·K]	$y = 4E-08x^3 - 8E-05x^2 + 0,0358x + 33,526$ $R^2 = 0,9978$

Taula 6-1 Equacions i coeficients de determinació per a les corbes de conductivitats pels materials A, B i C

- Calor específica de l'acer

La capacitat calorífica (C_p) és una propietat física que indica l'habilitat que presenta el material d'acer per a absorbir la calor proporcionada per fonts exteriors. En altres paraules la taxa de quantitat de calor transferida a la mostra, ∂Q , i el increment resultant en temperatura, ∂T , per la calor absorbida (Equació 6.1) [2,18].

$$C_p = \frac{\partial Q}{\partial T} \quad \text{Equació 6.1}$$

La calor específica, com la conductivitat tèrmica, varia amb la temperatura i la microestructura que presenta el material en aquell instant de temps. Quan la temperatura s'augmenta, l'energia cinètica en les partícules canvia. La calor es transferida de regions d'altres temperatures a regions a més baixa temperatura. Aquesta energia s'emmagatzema com a energia potencial en les partícules en el cas dels sòlids, ja que aquestes es troben estretament unides. En particular, la calor específica tendeix a assolir valors alts a temperatures properes a les que es dona les transformacions magnètiques (temperatura de Curie) [3]. A continuació es mostra l'evolució general de la capacitat calorífica dels acers en front de la temperatura (Figura 6.9):

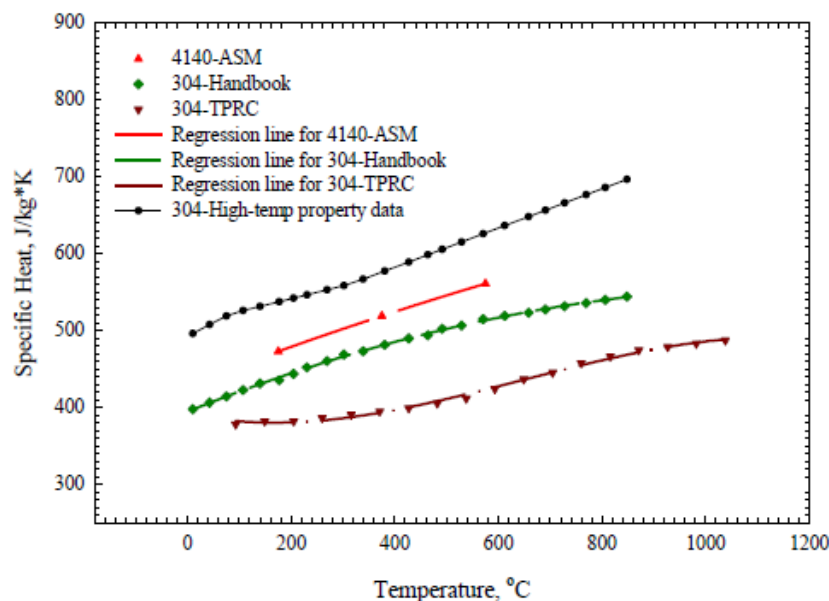


Figura 6-9 Evolució de la capacitat calorífica per a l'acer 4140 i acer inoxidable 304

(Font: [2])

En aquest projecte, de la mateixa manera que la conductivitat tèrmica, la seva determinació es realitza exactament mitjançant el mateix procediment, és a dir, calculant els valors amb el conductímetre LFA 457/2/G Micro Flash™.

A continuació es mostra gràficament l'evolució de la conductivitat tèrmica resultant, obtinguda amb l'equip de conductivitat tèrmica per a cada material d'estudi (Figura 6.10):

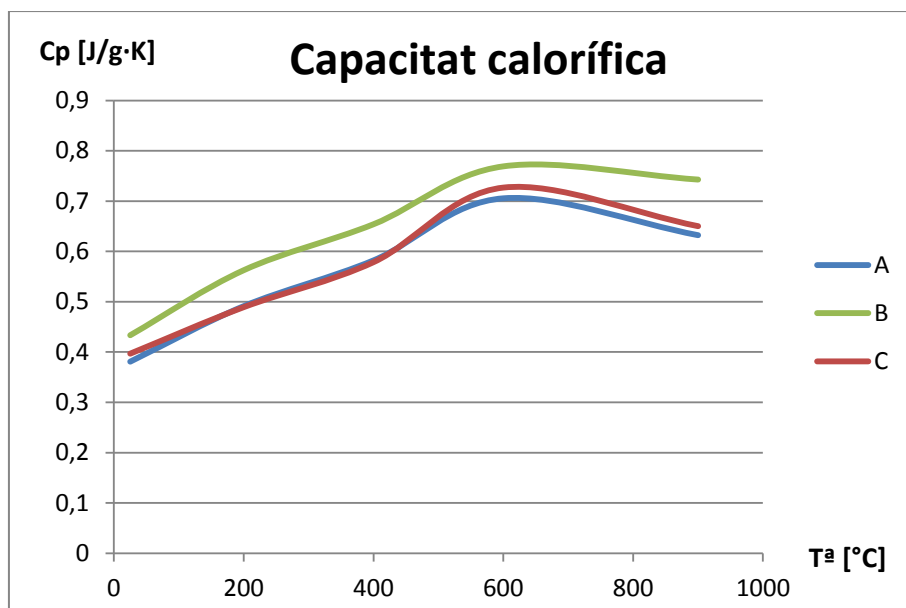


Figura 6-10 Evolució de la capacitat calorífica en front de la temperatura per als materials d'estudi

En la següent Taula 6.2 es recullen les equacions i coeficients de determinació (R^2) per a cadascun dels materials assajats.

A	C_{pA} [J/g·K]	$y = -1E-09x^3 + 1E-06x^2 + 0,0003x + 0,3765$ $R^2 = 0,9877$
B	C_{pB} [J/g·K]	$y = -7E-10x^3 + 4E-07x^2 + 0,0006x + 0,4228$ $R^2 = 0,9914$
C	C_{pC} [J/g·K]	$y = -2E-09x^3 + 2E-06x^2 + 6E-05x + 0,4$ $R^2 = 0,9827$

Taula 6-2 Equacions i coeficients de determinació per a les corbes de calor específica pels materials A, B i C

Finalment, més enllà de la determinació de la conductivitat tèrmica i la calor específica per a cada material, el conductímetre LFA 457/2/G Micro FlashTM és capaç de retornar-nos també el càlcul de la difusivitat tèrmica de cada acer assajat.

La difusivitat tèrmica (α) és una propietat específica de cada material per caracteritzar la conducció de calor en condicions no estacionàries. Més detalladament, aquest valor descriu quan ràpid és un material a l'hora de reaccionar sota un canvi brusca de temperatura, per exemple, davant d'una variació brusca de temperatura en la superfície.

La difusivitat tèrmica es pot calcular mitjançant la següent expressió (Equació 6.2):

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot C_p} \quad \text{Equació 6.2}$$

A continuació es mostra la variació d'aquesta propietat per als nostres acers d'estudi (Figura 6.11).

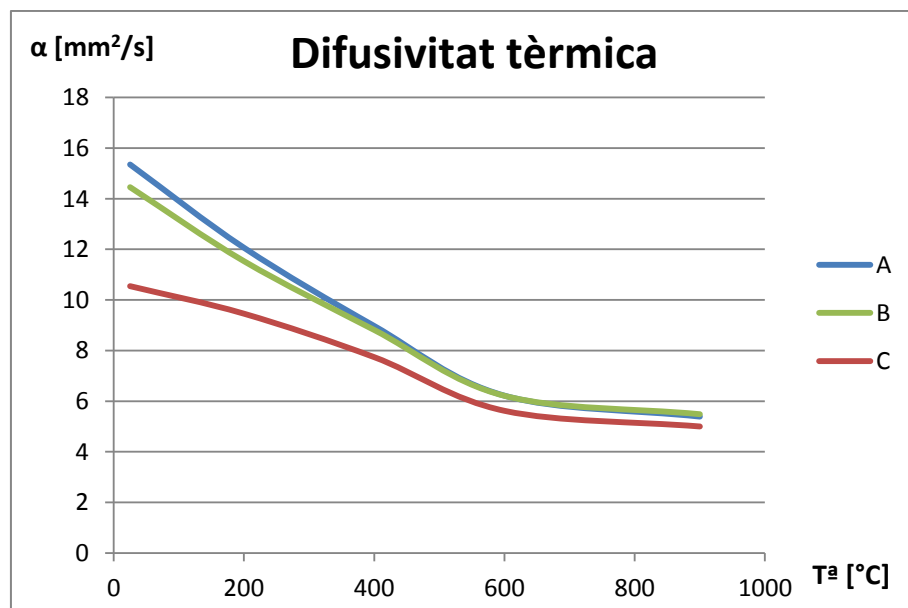


Figura 6-11 Evolució de la difusivitat tèrmica en front de la temperatura per als materials d'estudi

6.3.3. Procediment d'assaig

A continuació es mostren els passos emprats per a la realització dels diferents assajos durant l'estudi:

1. Inicialment les provetes es netegen de possibles impureses durant 15 minuts mitjançant un equip d'ultrasons. D'aquesta manera s'elimina qualsevol impuresa i s'assegura un bon contacte entre el termoparell i la superfície de la proveta [19].
2. Es passa el termoparell per dins del seu suport i s'introdueix pel forat mecanitzat de la proveta per tal de registrar la temperatura en el seu centre. S'ha d'assegurar amb filferro el termoparell per tal de que no es surti durant l'assaig (Figura 6.12).
3. La proveta d'assaig es situa en el centre del forn amb el termoparell correctament ubicat. El forn es programa per tal de que escalfi fins a 850°C i es mantingui a aquesta temperatura fins que el nucli de la proveta assoleixi temperatura. En el cas que l'assaig es dugui a terme amb el medi fluid a temperatura de 80°C s'utilitza un forn auxiliar per a l'escalfament del líquid. A mesura que el medi de tremp es va escalfant s'agita una mica amb una vareta per tal d'assegurar una temperatura homogènia en la totalitat del fluid.
4. Es connecta el datalogger i s'inicia el registrament de les dades. La freqüència de mostreig és de 0,05 segons.
5. Es prepara el recipient que conté el fluid de tremp al costat del forn, i s'agita per tal d'assegurar una temperatura homogènia en tot el líquid.
6. Quan la proveta ha assolit la temperatura de 850°C (+/- 5°C) es treu del forn mitjançant unes pinces i s'introdueix ràpidament en el medi de tremp d'estudi. La transferència del forn al recipient ha de ser menor a 2 segons.
7. És manté la proveta dins del recipient sense agitar fins que la temperatura al centre de la proveta disminueix per sota dels 40°C.
8. Es para el registrament de dades i es treu la proveta del líquid.



Figura 6-12 Proveta ISO amb el termoparell assajada

9. Es neteja la proveta i es reemplaça per una altre proveta per tal de realitzar el següent assaig.
10. Es realitza un mínim de 2 assajos per cada material d'estudi.

6.4. Segona part – Cas d'estudi per al Material A

Un cop realitzats els assajos amb les provetes de longitud 60mm i diàmetre 12,5mm segons la normativa ISO9950, es decideix realitzar el mateix tipus de assajos per al material A a una escala major. Per dur-lo a terme es van mecanitzar 4 blocs de dimensions 100x100x110mm amb 6 forats, mecanitzats a diferents profunditats, per a introduir els termoparells. A més a més, es van introduir una sèrie de punts crítics, com ara diferents forats que travessen la peça en diferents direccions, per observar la capacitat que presenta el material davant situacions de refredament crítiques en les que es poden produir esquerdes segons el punt geomètric de la peça a on ens trobem (Figura 6.13). És a dir, aquells punts on l'espessor del bloc és més petit es refredarà molt més ràpidament que aquell altre punt que conté més massa de material al voltant. Com a conseqüència, és més fàcil l'aparició d'esquerdes en aquells punts on el refredament s'ha dut a terme de manera més ràpida. Els plànols de la mecanització d'aquest blocs es troben en l'Annex D.

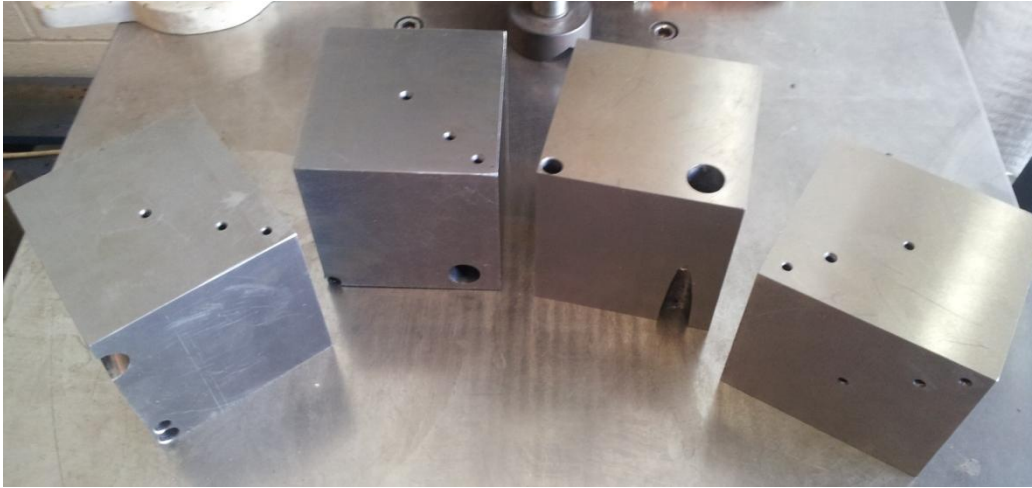


Figura 6-13 Blocs material A mecanitzats per al cas d'estudi

Els 6 forats destinats a la introducció dels termoparells es van mecanitzar de tal manera que poguéssim ubicar 2 termoparells per posició, és a dir, dos termoparells per registrar la temperatura en el nucli, dos termoparells per a la posició intermitja, i finalment dos termoparells per a registrar l'evolució de temperatura en la superfície (Figura 6.14). Com a conseqüència, ens assegurem una mica més el registrament de les dades en aquests punts, ja que si un termoparell d'una posició es surt durant el tremp, sempre ens quedarà un altre termoparell que registra aquestes dades.



Figura 6-14 Termoparells ubicats en les seves respectives posicions en el bloc d'assaig

Per aquests assajos, la temperatura d'austenització a la qual es van escalfar els blocs va ser de 1020°C, amb un manteniment posterior d'una hora a partir de la temperatura del nucli. Així assegurem una temperatura homogènia en tots els punts de la peça.

La diferència principal entre el nostre cas d'estudi i les proves realitzades en el laboratori, a part de la geometria i dimensions de la peça, és que en aquest assajos vam proporcionar la màxima agitació possible a l'hora de realitzar el tremp. L'objectiu de l'agitació consisteix en aconseguir un refredament molt més ràpid per tal d'aconseguir la microestructura martensítica.

En total es van programar quatre tremps que es van dur a terme amb les següent condicions:

- **1^{er} tremp:** Oli a temperatura ambient.
- **2^{on} tremp:** Oli a 80°C de temperatura.
- **3^{er} tremp:** Aigua salada a temperatura ambient.
- **4^{rt} tremp:** Aigua salada a 80°C de temperatura.

El registrament de les dades durant el procés de refredament es va realitzar de la mateixa manera que en la primera part. Mitjançant el datalogger DATAQ DI-718-ES es van realitzar 7 connexions amb les quals es va captar l'evolució de la temperatura en tots els punt d'interès de la peça, i la temperatura a la que es trobava el fluid de tremp (a uns 25mm de distància de la peça) durant el procés. Finalment, amb l'obtenció de les dades de temperatura en funció del temps, ja es poden determinar les corbes de refredament i velocitats de refredament per a cada medi i punt de la peça.

7. RESULTATS EXPERIMENTALS I DISCUSSIÓ

Un cop realitzat el treball experimental descrit en el capítol 6, es procedeix al tractament de les dades registrades per a cada acer assajat. En el present capítol es presentaran els resultats experimentals obtinguts per a la primera part d'experimentació i la segona part d'estudi, respectivament.

7.1. Caracterització dels banys

Pels assajos en el laboratori seguint en la mesura de lo possible la normativa adaptada ISO9950, els resultats obtinguts per a cada medi de tremp es mostren a continuació.

Pel que fa a les temperatures d'ebullició de cada bany, les quals afectaran al mecanisme de refredament dels banys, cal esmentar que a una pressió de treball d'1 atm la temperatura d'ebullició per a l'oli destinat al tremp és pròxima a 480°C. Per altra banda, una addició de 1000g de sal en 2 litres d'aigua, elevarà la temperatura d'ebullició de l'aigua salada entorn els 108,62°C.

7.1.1. Resultats experimentals

➤ Oli a 80°C

La Figura 7.1 i Figura 7.2 mostra les corbes de refredament i corbes de velocitat de refredament ($\partial T/\partial t$) per als nostres materials d'estudi A, B i C. Les corbes de velocitat de refredament s'extreuen mitjançant el càlcul de petits intervals de temperatura i temps. És a dir, obtenim quina disminució de temperatura hem obtingut en un petit interval de temps consecutiu ($\Delta T/\Delta t$).

Les dades d'interès es van registrar amb una freqüència de mostreig de 0,05 segons, per tant, va ser necessari l'eliminació del soroll mitjançant el càlcul promig per a les temperatures que comprenen un segon d'assaig. És a dir, es van suavitzar les dades fent un promig de 20 punts consecutius abans de graficar les corbes. D'aquesta manera les gràfiques d'interès queden representades d'una manera més neta i visual.

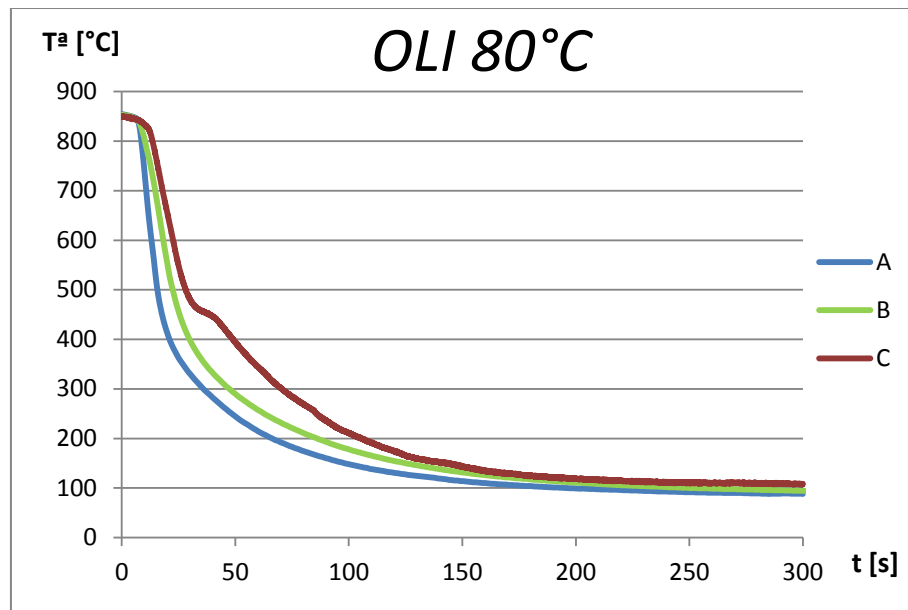


Figura 7-1 Corbes de refredament pels materials A, B i C trempats en oli a 80°C

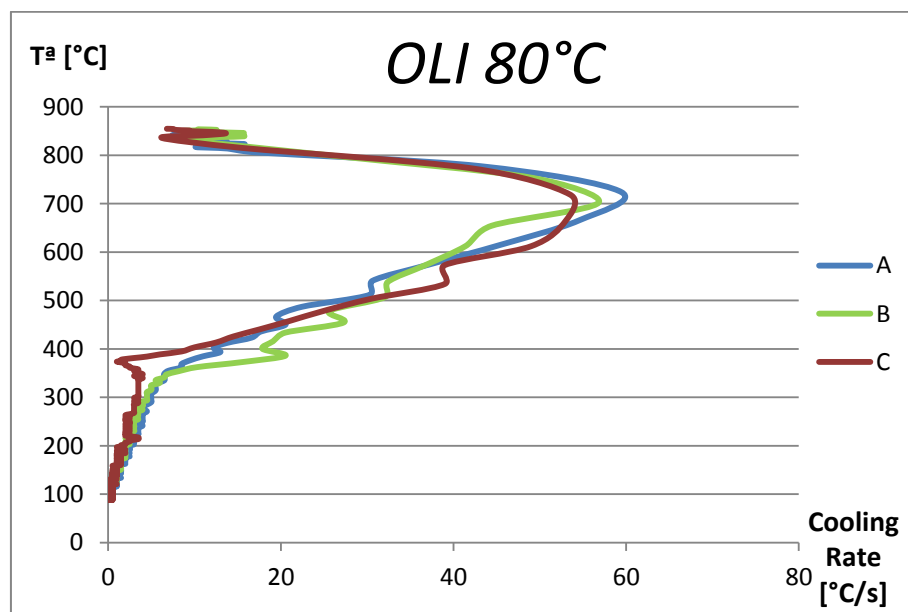


Figura 7-2 Corbes de velocitat de refredament pels materials A, B i C trempats en oli a 80°C

Tal com es pot observar en la Figura 7.2, es distingeixen els diferents mecanismes de refredament explicats en el apartat 5.2. Inicialment, i, a temperatures compreses entre 850 i 815°C, els nostres acers es troben en la fase vapor o ebullició de pel·lícula. Aquesta etapa es reconeix perquè les velocitats obtingudes són relativament baixes degut a la formació de la capa de vapor aïllant que envolta la peça.

Un cop aquesta capa de vapor es trenca entrem en la segona etapa de refredament o ebullició nucleada, a on s'aconsegueixen les velocitats més elevades del procés. Si ens fixem en la Figura 7.2, s'observa com el comportament per als tres materials es prou semblant en el rang de 800 a 650°C, tot i que el material A aconsegueix la velocitat màxima més elevada.

Aquesta segona etapa de refredament presenta una gran importància a l'hora d'assolir un dels nostres objectius de formació d'estructura martensítica. Generalment, el nas perlític es troba a temperatures al voltant de 700°C, per tant, el fet d'aconseguir la velocitat màxima de refredament per sobre d'aquesta temperatura, per a tots tres materials, augmenta les possibilitats de superar aquesta zona.

Un cop s'han aconseguit les màximes velocitats de refredament entrem en l'última de les etapes de refredament o etapa de convecció. Aquesta es dona quan la temperatura de la superfície baixa per sota de la temperatura d'ebullició del líquid. Conseqüentment, la superfície queda permanentment mullada pel fluid i les velocitats de refredament per als acers A, B i C durant aquesta etapa són baixes, ja que venen determinades pel coeficient de convecció i la viscositat de l'oli.

Tal com s'ha esmentat en capítols anteriors, aproximadament quan s'inicia l'etapa de convecció es produeix el començament de transformació martensítica (aproximadament a una temperatura de 300°C). Per tant, en aquesta etapa es requereixen velocitats lo suficientment baixes per tal d'evitar l'aparició de distorsió i esquerdes en el nostre material.

Cal esmentar que la corba de refredament juntament amb la corba de velocitat de refredament s'empra per a determinar el coeficient de transferència de calor en funció de la temperatura de la superfície. A més a més, també van ser necessaris els valors de conductivitat tèrmica i calor específica obtinguts, mitjançant el conductímetre, per a cada material (apartat 6.3.2). El càlcul es va realitzar utilitzant el mètode de la resistència interna despreciable, el qual s'ha vist en el capítol 5.5.1 del projecte.

El coeficient de transferència de calor calculat a una determinada temperatura de la peça representa la potència tèrmica que es transfereix entre la superfície de la peça i

el medi de tremp caracteritzat. La seva representació per a cada acer es pot utilitzar per a realitzar una comparació pràctica entre els diferents medis i condicions de tremp. A continuació, es mostra el coeficient de transferència de calor que s'ha obtingut per a l'oli a 80°C en el nostres materials d'estudi (Figura 7.3):

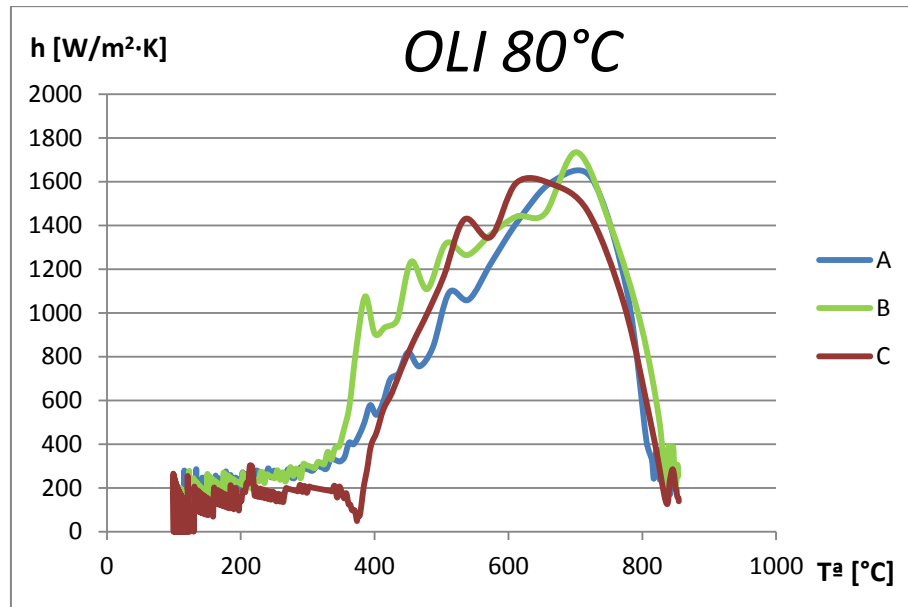


Figura 7-3 Coeficient de transferència de calor pels materials A, B i C trempats en oli a 80°C

Tal com es pot observar a la Figura 7.3, els tres períodes de transferència de calor tenen una forta influència en la variació del coeficient de convecció. Per a un instant inicial, entre uns 850 i 800 $^{\circ}\text{C}$, es dona la primera de les etapes de refredament juntament amb la seva transició, de tal manera que s'observa com l'efecte aïllant de la capa de vapor actua de tal forma que s'aconsegueixen valors baixos situats entre 150 i 400 $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$.

Seguidament, es fa palès que els valors més elevats de coeficient de transferència de calor s'obtenen en aquella etapa on s'aconsegueixen velocitats de refredament més elevades (ebullició nucleada). És a dir, a temperatures elevades, entre 800 i 500 $^{\circ}\text{C}$, l'oli a 80°C ens proporciona una màxima extracció de calor.

Un cop les peces d'acer s'han refredat per sota del punt d'ebullició, al voltant dels 450 $^{\circ}\text{C}$, els coeficients de convecció comencen a disminuir fins que finalment adopten un valor més constant compresos entre 150 i 300 $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$. A més a més, a mesura que

la peça va assolint la temperatura del bany, l'extracció de calor proporcionada pel líquid és menor.

Cal destacar que, un cop obtinguts els valor del coeficient de transferència de calor es va calcular el nombre de Biot amb cadascun dels valors representats en la gràfica, per tal de validar l' utilització del mètode de la resistència interna despreciable. Com a resultat es van obtenir valors per sota de la condició imposada ($Bi < 0,1$), per tant, podem considerar el mètode emprat com a correcte.

Finalment, la Taula 7.1 recull els paràmetres més comuns que quantifiquen el procés de tremp per a tots tres acers. D'aquesta manera serem capaços d'observar més clarament les principals diferències entre aquests acers de diferent composició química, per aquesta condició d'assaig.

	t_u [s]	T_u [°C]	v_u [°C/s]	$v_{m\grave{a}x}$ [°C/s]	$T^a_{m\grave{a}x}$ [°C]	v_{300} [°C/s]	$h_{m\grave{a}x}$ [W/m ² ·K]	T^a_h [°C]
A	6,46	845,23	10,02	59,47	723,99	5,00	1617,22	723,99
B	7,57	837,68	11,44	56,83	702,12	4,50	1735,38	702,12
C	11,60	835,50	9,22	53,50	718,50	3,50	1595,72	612

Taula 7-1 Resultats dels paràmetres més comuns que caracteritzen el procés de tremp en oli a 80°C per als diferents acers

L'etapa d'ebullició de pel·lícula (primera etapa de refredament) és una etapa molt ràpida que es molt difícil de caracteritzar degut a la possibilitat d'una formació de capa de vapor no homogènia. És a dir, poden existir punts de la proveta en que la formació de les bombolles de vapor es doni més ràpidament, que algunes bombolles siguin més grans que les altres o que la superfície de la pròpia proveta no permeti una ràpida eliminació del vapor (estancament de bombolles en porus). De totes maneres, dels resultats obtinguts es poden excloure algunes conclusions interessants.

Si ens fixem en les tres primeres columnes de la Taula 7.1, es veu com cada material necessita un temps diferent per trencar la capa de vapor característica d'aquesta etapa (t_u). Aconseguint una diferència màxima entre el material A i C de 5 segons aproximadament. Això provoca que el nostre material A comenci abans a assolir velocitats de refredament més elevades, lo que es tradueix en una augment de la

possibilitat d'evitar entrar en la zona de formació de microestructura perlítica. A més a més, pel material A també es denota com l'etapa d'ebullició nucleada comença a una temperatura més elevada (T_u) en comparació amb els materials B i C, que presenten uns valor similars entre ells. Pel que fa a la velocitat promig aconseguida (v_u), es veuen unes petites diferències d'un segon entre els materials. Aquest és un valor difícil de caracteritzar ja que depèn del comportament de la capa de vapor, i com s'ha comentat anteriorment poden existir molts factors que influeixin en la seva formació o desaparició.

Per a l'etapa d'ebullició nucleada (segona etapa de refredament), si fem una comparació més detallada mitjançant la Taula 7.1, veiem com el material A assoleix una velocitat màxima de refredament de 59,47°C/s. És a dir, en comparació amb la resta de materials, supera en 2,64°C/s al material B, i en 4,97°C/s al material C. La raó d'aquest comportament es pot trobar en la seva conductivitat tèrmica i calor específica. Tal com es pot comprovar en l'apartat 6.3.2, els materials A i B presenten una difusivitat tèrmica amb un comportament molt similar com a conseqüència dels seus valors de conductivitat tèrmica i calor específica. Això fa, que les seves diferències a l'hora d'estudiar el seu refredament no siguin molt destacables. Per contra, el material C presenta una difusivitat tèrmica més baixa que el material A i B. Per aquest motiu, aquest material presenta uns valors de refredament més lents. En conclusió, tant el material A com el B ens ofereixen un refredament similar i més ràpid que el material C.

Pel que fa a la Figura 7.3, a on es comparen els coeficients de convecció o de transferència de calor, es veu com aquell material que ha aconseguit la màxima velocitat de refredament (material A), no ha assolit el màxim coeficient de convecció durant la totalitat del procés. El coeficient de transferència de calor, tal com es pot comprovar, no és un paràmetre fix, sinó que varia a mesura que avança el tremp. Aquest coeficient depèn de diferents variables com la geometria, l'estat de les superfícies, les temperatures entre la superfície de contacte i el líquid, i la velocitat del fluid o agitació. Durant l'elaboració d'aquest projecte, les provetes es van mecanitzar de tal manera que fossin pràcticament iguals. Per això, les possibles variacions que es poden produir en els valors del coeficient de convecció majoritàriament es deuran a la

influència del operari encarregat de realitzar l'assaig, ja que tots els assajos es van dur a terme manualment, a la temperatura a la que es troba la superfície de la proveta, a la velocitat de refredament i a les propietats tèrmiques que presenti el material d'estudi en aquell instant.

Com es pot comprovar observant la Taula 7.1, el material B és l'acer que assoleix el valor més alt de coeficient de convecció entre els materials d'estudi ($1735,38 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$), següidament del material A ($1617,22 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$). Com que els materials A i B presenten un refredament bastant similar, les possibles diferències que es poden donar venen donades pels factors esmentats anteriorment.

També es interessant observar que, tant en el material B com en el C, el valor màxim de coeficient de transferència de calor es dona a temperatures més baixes que el material A, és a dir, el coeficient de transferència de calor és sensible a la diferència entre la temperatura de la superfície i la temperatura del líquid.

➤ Oli a temperatura ambient

Els assajos a temperatura ambient es van dur a terme mitjançant el mateix procediment que en el apartat anterior. En aquest apartat estudiarem el comportament de cada un dels materials sota aquestes condicions de tremp, tot i que en el apartat 7.2 veurem més detalladament la influència que presenta la temperatura del bany en el procés.

Aproximadament, la temperatura de l'oli es troba en un rang comprès entre 18 i 20°C a l'hora de realitzar els assajos. A continuació es mostren les gràfiques comparatives que es van registrar mitjançant el datalogger, juntament amb la seva pertinent taula de resultats.

La Figura 7.4, Figura 7.5 i Figura 7.6 mostren, d'una manera visual i clara, com es comporta cada un dels materials a l'hora de trempar-los en oli a temperatura ambient.

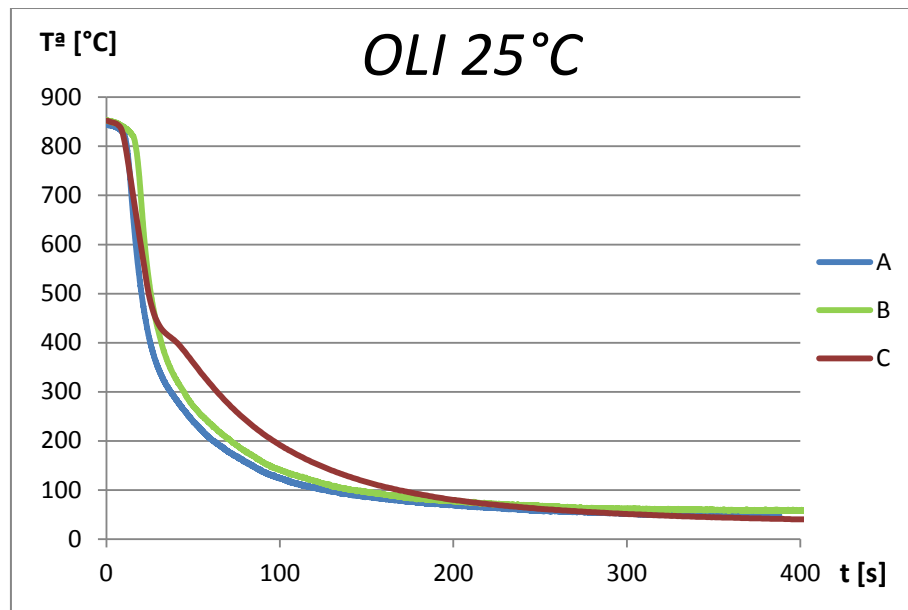


Figura 7-4 Corbes de refredament pels materials A, B i C trempats en oli a temperatura ambient

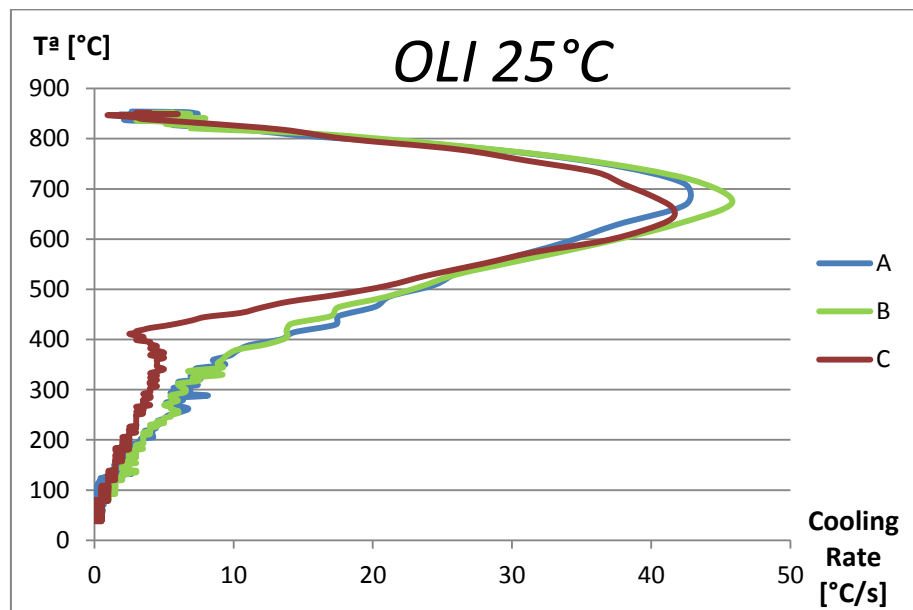


Figura 7-5 Corbes de velocitat de refredament pels materials A, B i C trempats en oli a temperatura ambient

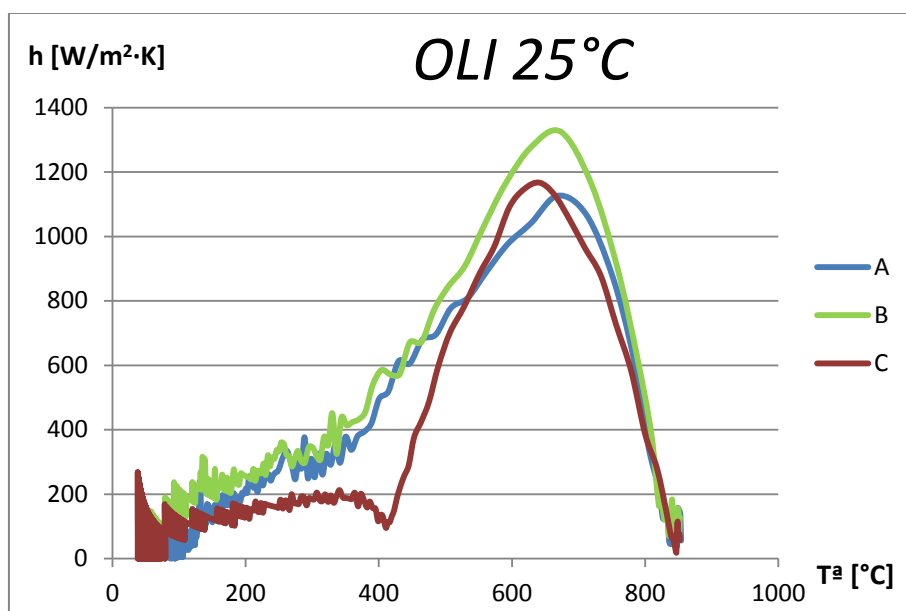


Figura 7-6 Coeficient de transferència de calor pels materials A, B i C trempats en oli a temperatura ambient

	t_u [s]	T_u [°C]	v_u [°C/s]	$v_{m\grave{a}x}$ [°C/s]	$T^a_{m\grave{a}x}$ [°C]	v_{300} [°C/s]	$h_{m\grave{a}x}$ [W/m ² ·K]	T^a_h [°C]
A	10,40	824,84	4,49	42,48	668,60	5,67	1126,56	668,60
B	13,40	829,26	5,70	45,84	673,16	6,55	1325,68	673,16
C	11,00	818,00	5,00	41,50	663,50	4,00	1167,51	641

Taula 7-2 Resultats dels paràmetres més comuns que caracteritzen el procés de tremp en oli a temperatura ambient

Per aquest cas, si ens fixem detalladament en els resultats obtinguts (Taula 7.2), veiem com a la primera etapa de refredament (etapa d'ebullició de pel·lícula) continuem tenint unes petites diferències entre els materials d'estudi. Tot i que aquesta etapa és difícil de caracteritzar, observem com el material A continua necessitant menys temps (t_u) per superar la formació i desaparició de la capa de vapor que actua com aïllant. De totes maneres, la comparació més destacable es dona en les velocitats promig aconseguides per tots tres materials (v_u), ja que sota aquestes condicions de tremp els tres materials obtenen unes velocitats promig molt semblants, no superant els 1,21°C/s com a màxima diferència.

Un cop iniciem la segona etapa de refredament (etapa d'ebullició nucleada), podem extreure algunes de les conclusions més interessants del procés. Si ens fixem en la velocitat màxima aconseguida ($v_{m\grave{a}x}$) observem com la diferència de velocitat ha disminuït entre els materials. Per el cas anterior (oli a 80°C), la màxima diferència es trobava en uns 6°C/s aproximadament, i ara hem disminuït a un ordre de 3°C/s.

Com es pot comprovar observant la Figura 7.4, el material A és aquell es capaç de refredar-se més ràpidament en comparació amb la resta. Certament, inicia l'assoliment de les velocitats de refredament més elevades abans que la resta dels materials (3 segons abans que el material B), però això no implica que aconsegueixi la màxima velocitat de refredament. Sota aquestes condicions de tremp, el material B és el que ens ha proporcionat la velocitat màxima, aconseguint una velocitat màxima de 45,84°C/s, la qual supera en 3°C/s la velocitat màxima del material A. Com ja s'ha comentat anteriorment, tant el material A com el B presenten una difusivitat tèrmica similar que provoca que el seu comportament a l'hora de refredar-se sigui molt semblant. Petites fluctuacions o canvis, a l'hora d'assajar cada proveta en qüestió, poden provocar canvis que alterin en algun ordre de magnitud els resultats entre el material A i B.

En general, si comparem les velocitats obtingudes a temperatura ambient amb les registrades a temperatura de 80°C, tots tres materials han disminuït considerablement la seva velocitat de refredament. Ens trobem davant d'una disminució d'entre 11 i 17°C/s aproximadament. Però la raó d'aquest disminució ja la veurem més endavant en l'apartat 7.1.2.

Pel que fa a l'última de les etapes de refredament (etapa de convecció) tornem a observar una disminució general de les velocitats de refredament. Per a l'oli a temperatura ambient les velocitats aconseguides a temperatura d'inici de transformació martensítica es troben entre 4 i 6,5°C/s aproximadament. De nou, el material B és el material que presenta major velocitat en aquest rang de temperatures.

Finalment, si comparem els coeficients de convecció màxims aconseguits en aquest assaig veiem com el material A i C presenten uns valors molt similars, situats en un ordre de 1150 W/m²·K. En canvi, el material B torna a ser l'encarregat d'obtenir el

màxim valor, el qual es troba en un valor de $1325 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. És a dir, en el material B, a la temperatura de $673,16^\circ\text{C}$, s'extreu la calor de la superfície de la proveta més ràpidament. Pel que fa a les temperatures d'obtenció d'aquests valors, veiem com el material C aconsegueix el seu màxim a una temperatura 30°C inferior, aproximadament, de la resta de materials.

Com ha observació general, es fa palès que els valors per al coeficient de transferència de calor obtinguts per a l'assaig en oli a 25°C són inferiors als obtinguts per a l'oli a 80°C . Com a conclusió, es pot extreure que l'oli a temperatura de 80°C ens proporciona una extracció de calor major que a temperatura ambient.

➤ Aigua amb sal a 80°C

Tot i que el medi més comú per a realitzar el tractament tèrmic de tremp és l'oli, l'aigua amb sal també és un fluid que s'empra en el sector dels tractaments tèrmics. Degut a la seva alta severitat, ja que és un medi de tremp molt energètic, l'aigua amb sal és més propens a produir esquerdes en els punts crítics de la peça que es trempa, però un tremp en aigua sota condicions controlades ens proporciona una velocitat de refredament més ràpida, amb la conseqüència d'obtenció d'una duresa més elevada.

En aquest apartat, i en el següent, veurem com es comporten els nostres materials d'estudi sota condicions diferents. Per un tremp en aigua amb sal, a una temperatura de 80°C , els resultats obtinguts es mostren en les següents figures (Figura 7.7, Figura 7.8 i Figura 7.9):

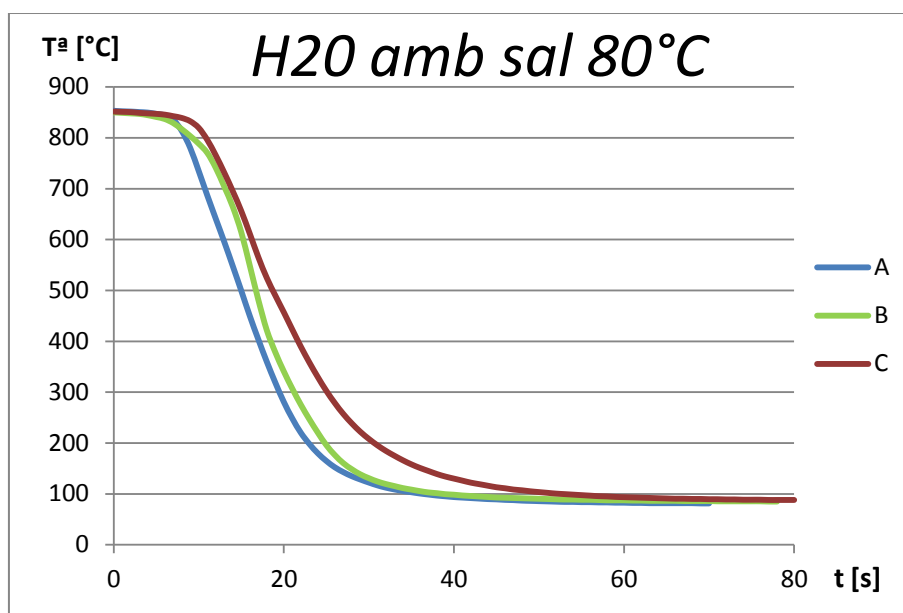


Figura 7-7 Corbes de refredament pels materials A, B i C trempats en aigua amb sal a 80°C

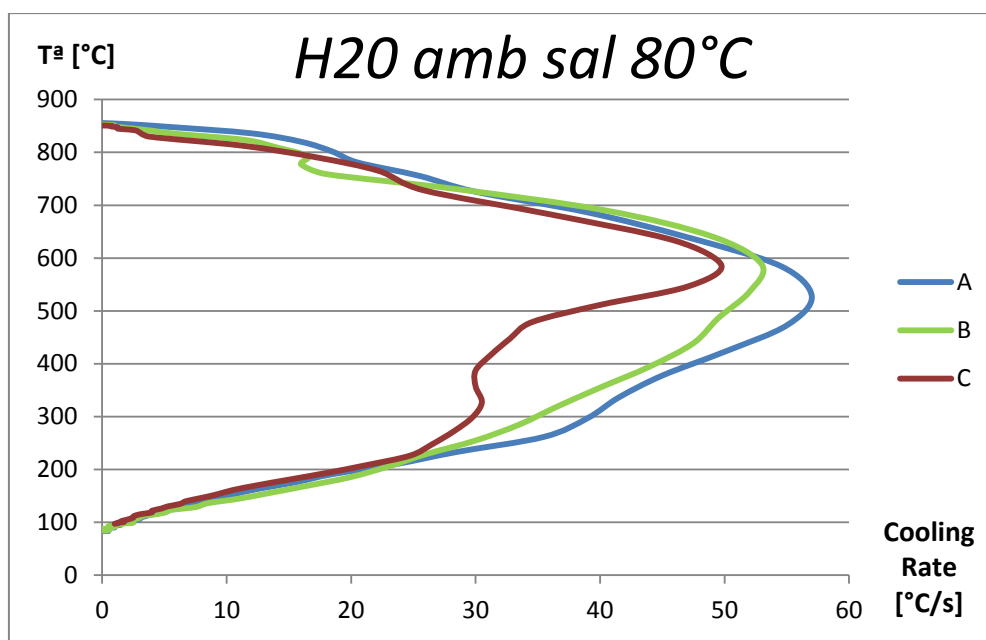


Figura 7-8 Corbes de velocitat de refredament pels materials A, B i C trempats en aigua amb sal a 80°C

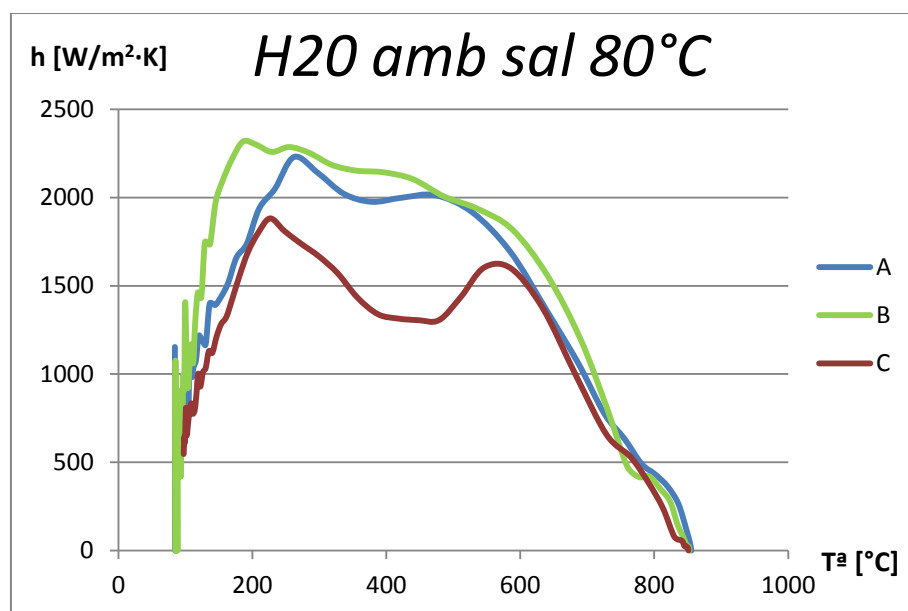


Figura 7-9 Coeficient de transferència de calor pels materials A, B i C trempats en aigua amb sal a 80°C

NOTA: Per a la realització d'aquests assajos no va ser possible l' utilització del datalogger DATAQ DI-718-ES per motius aliens al projecte. Per aquest motiu aquests assajos es van dur a terme amb un datalogger amb menor freqüència de mostreig (1s).

	t_u [s]	T_u [°C]	v_u [°C/s]	$v_{m\grave{a}x}$ [°C/s]	$T^a_{m\grave{a}x}$ [°C]	v_{300} [°C/s]	$h_{m\grave{a}x}$ [W/m²·K]	T^a_h [°C]
A	13	473	27,32	57,00	528,00	39,00	2229,42	262
B	19	486,5	18,30	53,00	588,00	36,50	2318,47	186
C	14	546	17,72	49,75	586,00	29,75	1882,06	226,5

Taula 7-3 Resultats dels paràmetres més comuns que caracteritzen el procés de tremp en aigua amb sal a 80°C

Prèviament, cal destacar que l' utilització d'un datalogger amb una freqüència de mostreig d'un segon no registrarà de manera ideal la variació de temperatura per aquest procés, degut a que l'aigua amb sal proporciona un refredament molt brusc degut a la seva alta severitat.

Tal com es pot observar a la Figura 7.9, especialment en els materials A i C, la primera etapa de refredament es perllonga fins aproximadament uns 600°C. Per aquesta etapa, els valors de coeficient de convecció inclouen els efectes de radiació i conducció a

través de la pel·lícula de vapor, per això, s'han obtingut valors prou elevats. Per al material A s'ha obtingut un valor de $2012,45 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, en canvi el material B i C presenta un valor de $2005,51 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ i $1603,37 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, respectivament. A més a més, cal destacar que al finalitzar aquesta primera etapa es produeixen les màximes velocitat de refredament, tal com es pot comprovar en la Figura 7.8 i la Taula 7.3. Si ens fixem en la Figura 7.8, observem que el material A és el que aconsegueix la màxima velocitat de refredament, seguitament del material B i per últim el material C. Més detalladament, la taula 7.3 ens mostra quines són les diferència exactes entre el materials en qüestió. Pel material A, la màxima velocitat aconseguida és de $57,00^\circ\text{C/s}$ a una temperatura de 528°C . Com es pot comprovar, aquesta velocitat supera els 53°C/s del material B, i els $49,75^\circ\text{C/s}$ per al material C. A més a més, destaca que el material A assoleix la màxima velocitat a una temperatura bastant inferior, 528°C , en comparació amb la resta de materials, els quals ho assoleixen a una temperatura molt similar de 588°C .

Teòricament, la primera etapa de refredament (juntament amb la transició) per a l'aigua pura es dona fins a temperatures de superfície prou baixes (al voltant de 220°C), però l'addició de sal, tal com es descriu a l'apartat 5.4.1, ajuda a disminuir el temps d'aquesta etapa de refredament, ja que la presència de sal dissolta en l'aigua evita l'aparició, en gran part, de la capa de vapor. A més a més, cal destacar que la característica principal que defineix els materials de Rovalma S.A., és que es tracten d'uns materials amb unes propietats tèrmiques que transfereixen el calor molt ràpidament. És a dir, estem tractant uns materials amb una conductivitat tèrmica bastant elevada que afavoreixen el procés de refredament. Aquesta és una de les raons per les quals s'estan aconseguint valors elevats de coeficient de convecció a temperatures més elevades.

Un cop superada l'etapa d'ebullició per pel·lícula al voltant dels 600°C , s'inicia l'etapa de transició fins arribar a l'etapa d'ebullició nucleada. En aquesta etapa es registren les extraccions de calor màximes pels materials A, B i C, tal com es pot comprovar a la Figura 7.9. Més específicament, el material B assoleix el valor més elevat ($2318,47 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$), tot i que el material A es troba només uns $90 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ per sota. En canvi, el material C com era d'esperar obté una potència de refrigeració bastant per sota

(1882,06 W/m²·K). En aquest punt es pot observar clarament com l'aigua amb sal proporciona una major extracció de calor a temperatures al voltant de 180 – 260°C, que no pas a temperatures més elevades.

Pels assajos en aigua amb sal és interessant representar l'evolució que pateix el coeficient de transferència de calor en funció del temps, degut a la dificultat que presenta la caracterització d'aquest medi de refredament. D'aquesta manera serem capaços d'observar més detalladament en quin instant obtenim una major extracció de calor. La Figura 7.10 mostra aquesta evolució:

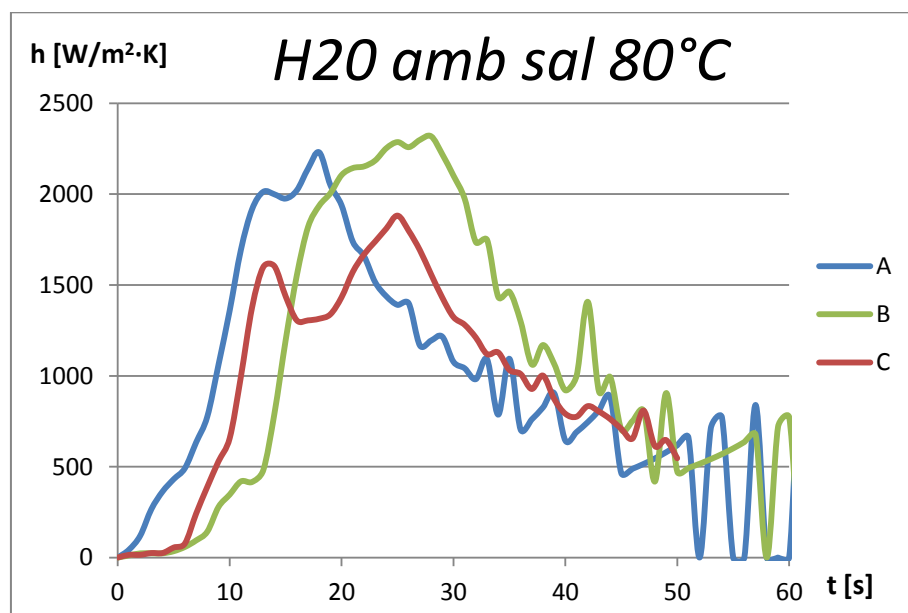


Figura 7-10 Evolució temporal del coeficient de transferència de calor pels materials A, B i C trempats en aigua amb sal a 80°C

Tal com es pot observar en la figura, generalment es distingeixen dos pics de màxima extracció de calor. El primer pic, el qual apareix al voltant dels 13 segons, correspon a l'extracció produïda per la primera etapa de refredament (ebullició de pel·lícula). Seguidament es produeix una davallada de coeficient de convecció (fase de transició) que ens portarà al segon pic de més interès, corresponent a la fase d'ebullició nucleada. Tal com s'ha esmentat anteriorment en aquest punt es dona el màxim valor de coeficient de convecció entre la peça i el fluid. Finalment s'inicia una disminució d'extracció de calor a mesura que ens apropem a la fase de convecció sense canvi de fase.

A l'hora d'apropar-nos a temperatures pròximes al inici de transformació martensítica (al voltant dels 300°C), ens interessa tenir una velocitat lenta. Tot i que generalment en el procés es registra una disminució considerable de velocitats de refredament, estem davant d'unes velocitats bastant elevades (v_{300}) en comparació amb les obtingudes amb els assajos d'oli. Això pot comportar l'aparició de distorsió i esquerdes en el nostre acer, amb el conseqüent rebuig de la peça tractada.

En conclusió, l'aigua amb sal es presenta com un bany de refredament que ens ofereix una major extracció de calor i unes velocitats de refredament més ràpides en comparació amb els valors aconseguits pels tremps amb oli.

➤ Aigua amb sal a temperatura ambient

L'últim dels assajos realitzats va ser el d'aigua salada a temperatura ambient. Es van trempar tots 3 materials A, B i C, seguint el mateix procediment que per la resta d'assajos. Cal destacar, que a l'hora de realitzar els tremps pels diferents materials, es va notar la severitat de la qual es fa al·lusió en la bibliografia. A l'instant inicial de submergir la proveta calenta en l'aigua, aquest immediatament va provocar un soroll d'alta intensitat provocat pel ràpid refredament de la peça. Aquest soroll, pels assajos en oli no era molt perceptible, però en l'aigua sí que es tornava molt més destacable.

Els resultats que es van registrar pels materials d'estudi es mostren en la Figura 7.11, Figura 7.12 i Figura 7.13. De la mateixa manera que en els apartats anteriors, també es mostra la Taula 7.4 on es poden observar els valors més destacables d'aquests tractaments.

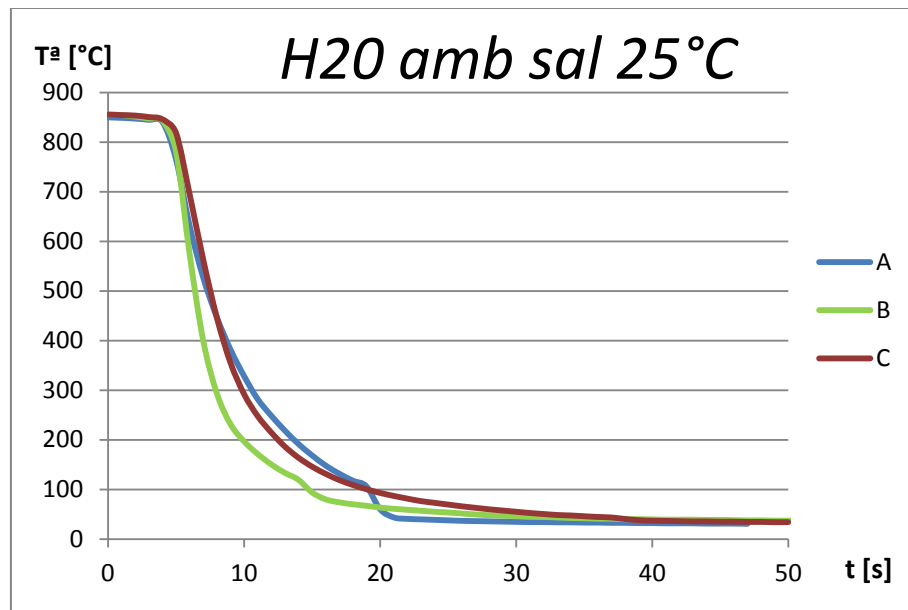


Figura 7-11 Corbes de refredament pels materials A, B i C trempats en aigua amb sal a temperatura ambient

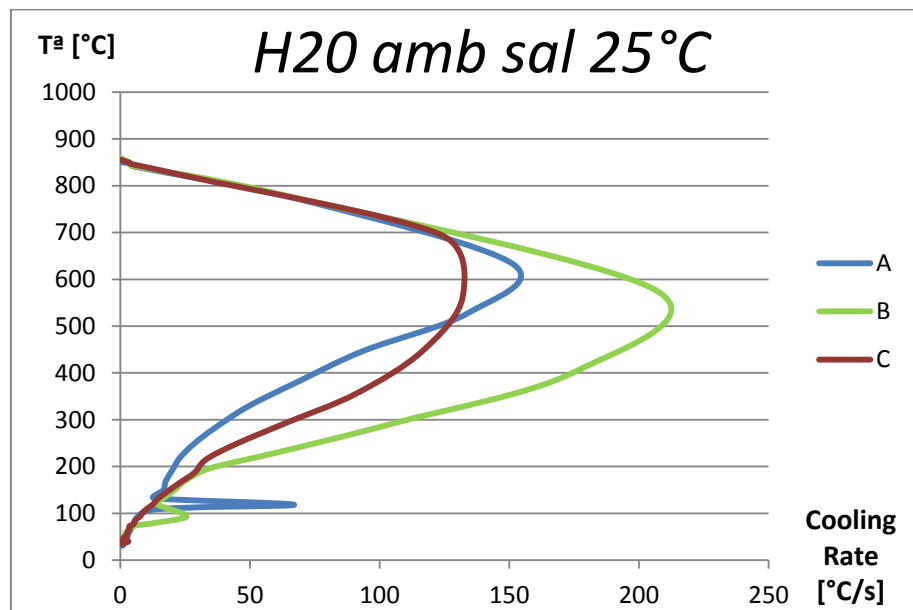


Figura 7-12 Corbes de velocitat de refredament pels materials A, B i C trempats en aigua amb sal a temperatura ambient

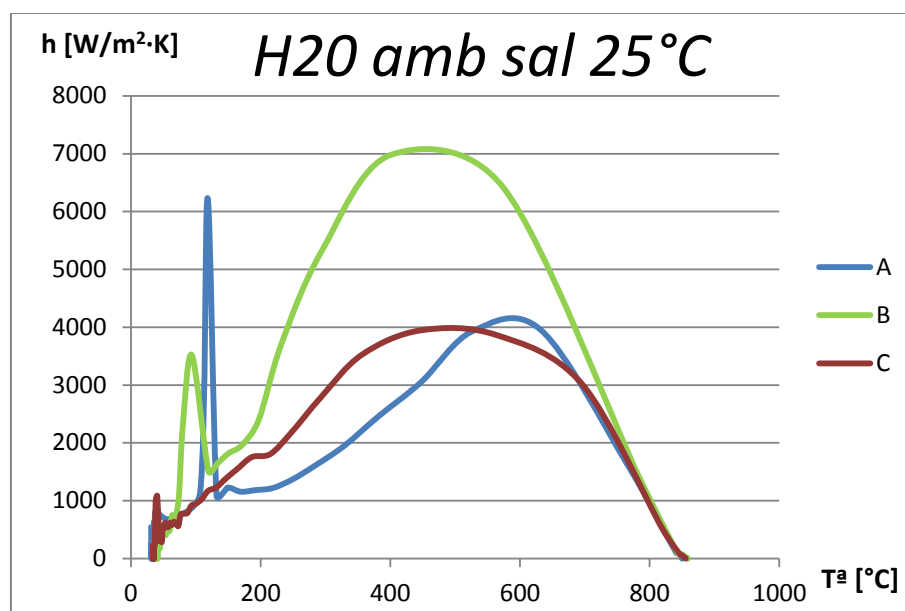


Figura 7-13 Coeficient de transferència de calor pels materials A, B i C trempats en aigua amb sal a temperatura ambient

NOTA: Per a la realització d'aquests assajos no va ser possible l' utilització del datalogger DATAQ DI-718-ES per motius aliens al projecte. Per aquest motiu aquests assajos es van dur a terme amb un datalogger amb menor freqüència de mostreig (1s).

	t_u [s]	T_u [°C]	v_u [°C/s]	$v_{m\grave{a}x}$ [°C/s]	$T^a_{m\grave{a}x}$ [°C]	v_{300} [°C/s]	$h_{m\grave{a}x}$ [W/m²·K]	T^a_h [°C]
A	6	632	34,75	151,50	632,00	49,50	6235,61	118
B	12	400,5	35,27	207,00	575,00	106,50	6979,62	400,5
C	8	447	45,39	132,00	563,50	63,50	3948,02	447

Taula 7-4 Resultats dels paràmetres més comuns que caracteritzen el procés de tremp en aigua amb sal a temperatura ambient

De la mateixa manera que l'apartat anterior, l'utilització d'un datalogger amb una freqüència de mostreig d'un segon fa que no es pugui caracteritzar el procés de refredament d'una manera òptima. No obstant, de les dades registrades es poden extreure alguns paràmetres d'interès.

Si ens fixem en la Figura 7.11 veiem com estem davant d'un procés molt ràpid, en el qual per a tots tres materials s'assoleixen temperatures inferiors a 100°C en menys de 20 segons. També, s'observa a la Figura 7.12 i a la Taula 7.4, com el material B és qui

assoleix la màxima velocitat de refredament d'entre tots tres materials. La seva velocitat de 207°C/s és molt superior als $151,50^{\circ}\text{C/s}$ aconseguits pel material A. Com era d'esperar, el material C torna a ser l'acer que ens proporciona la menor velocitat de totes, uns 132°C/s . Les temperatures a les quals s'aconsegueixen les màximes velocitat de refredament són molt dispars entre el material A i la resta. M'entrés el material A assolix la seva màxima velocitat a una temperatura de 632°C , el material B i C l'assolixen a una temperatura bastant més baixa, situada entorn els 570°C .

Pel que fa a les velocitats aconseguides a baixa temperatura, veiem com estem tractant d'unes dades amb uns valors massa elevats, especialment el material B. Tal com s'ha explicat durant el transcurs d'aquest treball, a baixa temperatura interessa tenir unes velocitats lentes per tal d'evitar l'aparició de distorsió i esquerdes. Per això, davant de les altes velocitat aconseguides durant la totalitat del procés, es va realitzar una breu observació de l'estat físic de les provetes. Segurament, la simplicitat de la geometria de la proveta assajada va evitar l'aparició d'esquerdes en el material. No obstant, la severitat de l'aigua amb sal mostrada a temperatura ambient fa que estiguem davant d'un medi de tremp no recomanable per al refredament de peces amb geometries més complexes.

Per acabar, en la Figura 7.13, es mostra els dos pics de màxima extracció de calor durant el procés de tremp. Possiblement, degut a la severitat en el tremp que produeix l'aigua amb sal a aquesta temperatura, l'alta conductivitat dels materials i l'addició de sal, es produeix un gran desprendiment de bombolles de la paret que augmenta molt la mescla i ens proporciona una extracció de calor molt elevada a una temperatura propera a 500°C . Per això, no és d'estranyar que per aquest primer pic a altes temperatures coexisteixin l'etapa d'ebullició de pel·lícula amb l'etapa d'ebullició nucleada, degut a l'agitació proporcionada pel propi desprendiment de bombolles. Un cop superat els 200°C , els materials A i B presenten un segon pic a una temperatura pròxima a la temperatura d'ebullició, el qual correspon a l'etapa de refredament per ebullició nucleada solament.

Durant el refredament del material B, s'ha obtingut un valor de coeficient de convecció que sobresurt en comparació amb el material A i C a altes temperatures. El seu valor

de $6979,62 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ és el més gran de tots tres assajos en aquest rang, ja que tant el material A, com el C, presenten uns valors similars de $3956,95 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ i $3948,02 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, respectivament. Per contra, a temperatures pròximes a la temperatura d'ebullició el material A és l'encarregat d'assolir un coeficient de convecció major de $6235,61 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, en comparació amb els $3517,12 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ del material B.

Finalment, la Figura 7.14 mostra l'evolució temporal del coeficient de transferència de calor per tal d'aclarir l'extracció de calor que es produeix en els diferents materials:

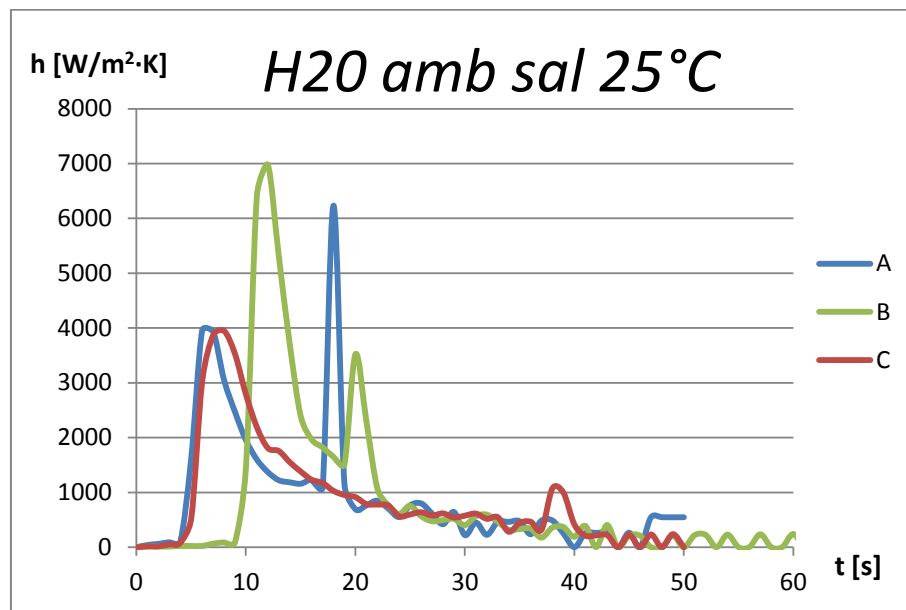


Figura 7-14 Evolució temporal del coeficient de transferència de calor pels materials A, B i C trempats en aigua amb sal a 25°C

Clarament s'observa com el material A i B presenten dos pics de màxima extracció de calor, tot i que el material B l'assoleix uns segons més tard. En aquests materials, sí que es diferencien dos pics corresponents a les etapes d'ebullició per canvi de fase. No obstant, per tal de realitzar un anàlisi complet que caracteritzi les diferents etapes de refredament en l'aigua salada, caldria realitzar un detall més exhaustiu, a nivell experimental, amb un datalogger de major freqüència de mostreig.

7.1.2. Efecte de la temperatura del bany en el tremp

L'efecte de la temperatura del bany en la corba de refredament, la corba de velocitat de refredament i en el coeficient de transferència de calor depèn fortament del tipus de fluid de tremp. En aquest capítol es descriu com afecta la variació d'aquest paràmetre en els nostres fluids d'assaig.

Generalment, la influència que provoca la variació de temperatura del bany en els acers presenta un comportament bastant similar. D'aquesta manera, per l'elaboració i simplificació d'aquest estudi, únicament es mostraran les gràfiques per al material A. No obstant, les gràfiques comparatives per al material B i C es poden trobar en l'Annex C.

➤ Tremp en oli

El principal avantatge dels olis es basa en la seva habilitat per proporcionar, de manera relativa, altes velocitats de refredament durant les etapes de refredament inicials. Per tant, incrementa la possibilitat d'evitar la formació de microestructura perlítica. Seguidament, a mesura que la temperatura de la peça s'apropa a la temperatura de transformació martensítica, l'oli ens proporciona una temperatura de refredament més lenta que ajuda a evitar l'aparició d'esquerdes i distorsió.

Un oli especial de tremp es va utilitzar per l'elaboració de tots els assajos que componen aquest projecte. Tot i que, per temes de confidencialitat, no es descriu el tipus d'oli ni la majoria de les seves característiques, els olis destinats al tractament tèrmic presenten el seu punt d'ebullició a una temperatura compresa entre 230 i 480°C.

Les Figures 7.15 a 7.17 mostren els efectes de la temperatura de l'oli en les seves propietats de transferència tèrmica. Per a l'obtenció d'aquests resultats es va trempar el material A a una temperatura de bany de 20 i 80°C.

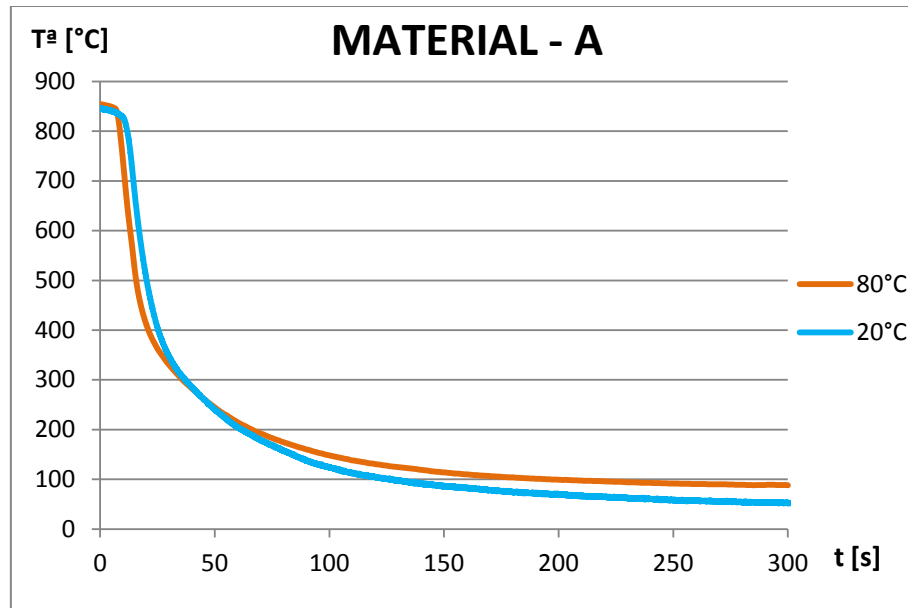


Figura 7-15 Corbes de refredament pel material A trempat en oli a 20 i 80°C

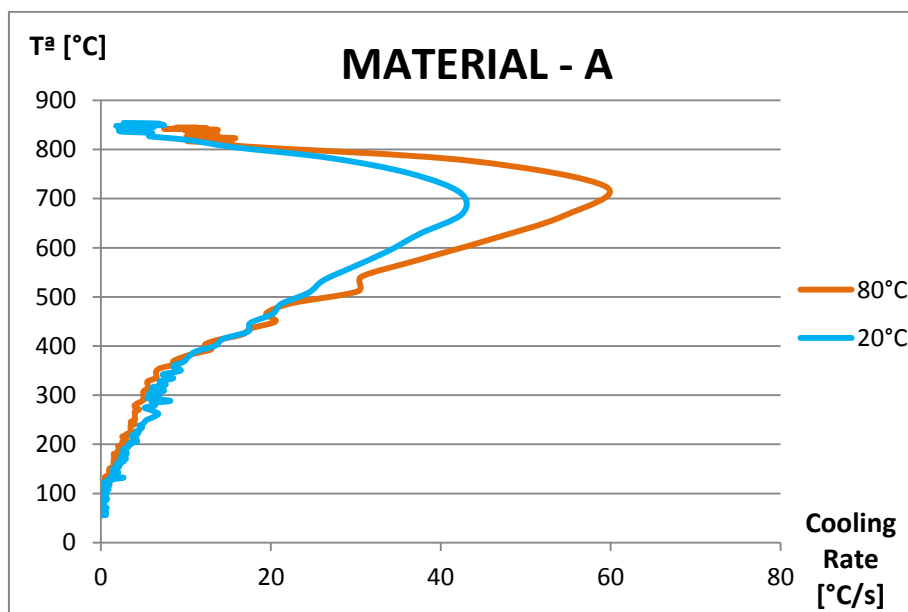


Figura 7-16 Corbes de velocitat de refredament pel material A trempat en oli a 20 i 80°C

Generalment, quan s'escalfa un oli la seva viscositat disminueix. Aquesta disminució de viscositat proporciona al líquid refrigerant una major fluïdesa que fa que augmenti la seva habilitat per mullar la superfície de la peça. Com a conseqüència, la turbulència encarregada de trencar la capa de vapor, generada en la primera etapa de refredament, augmenta i produeix un augment en la velocitat de refredament. Aquest fet es veu reflectit en l'adquisició per part de l'oli d'una major capacitat per refredar.

La segona etapa de refredament o ebullició nucleada és violenta per naturalesa, i és en aquest punt quan es donen les majors diferències. Quan l'oli s'escalfa a una temperatura de 80°C, la seva viscositat disminueix considerablement, per aquest motiu es capaç de proporcionar-nos velocitats més elevades. Tal com demostra la gràfica 7.16, a una temperatura de 724°C el nostre material A adquireix una velocitat màxima de refredament de 59,47°C/s. En canvi, aquest mateix material trempat en el mateix oli a una temperatura de 20°C, aconsegueix una velocitat màxima de refredament de 42,48°C/s a 669°C. S'observa una diferència de 17°C/s, fet que demostra que l'oli a 80°C proporciona una major velocitat de refredament.

Al voltant dels 400°C observem una disminució de la velocitat de refredament. A més a més, veiem com les diferències entre les velocitats de refredament són molt lleus. Per tant, podem concloure que a altes i baixes temperatures de bany aquest oli ens retorna velocitats d'extracció de calor bastant similars.

Finalment, la Figura 7.17 mostra el càlcul del coeficient de transferència de calor com a funció de la temperatura de la superfície a diferents temperatures d'assaig. En principi, una velocitat de refredament elevada ens hauria de proporcionar una coeficient de transferència de calor major. Per tant, aquell oli que ens permeti aconseguir velocitats de refredament més grans serà el que tingui major coeficient de transferència de calor i millor habilitat per refredar. En conseqüència, l'extracció de calor serà més eficient i ràpida.

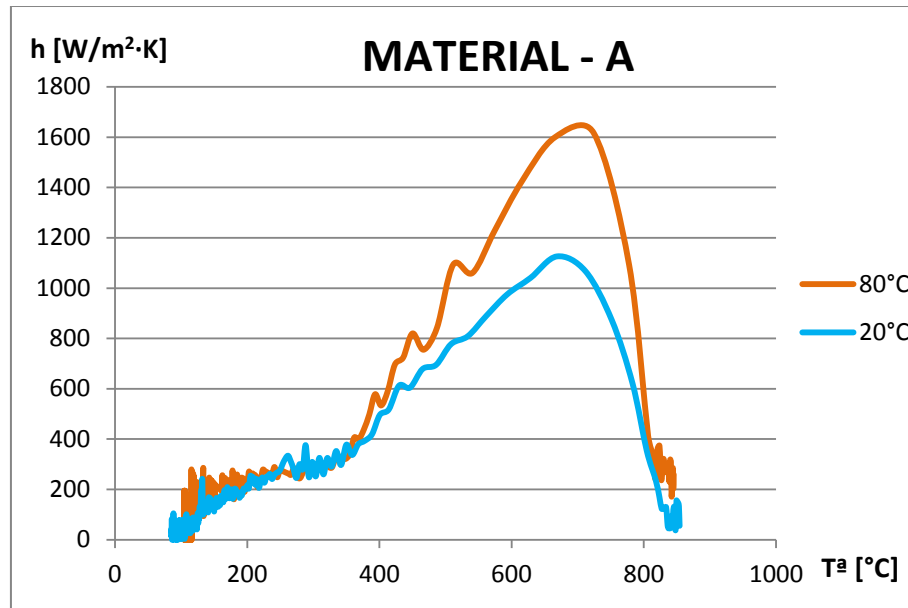


Figura 7-17 Coeficient de transferència de calor pel material A trempat en oli a 20°C i 80°C

Tal com era d'esperar, es veu com l'oli escalfat a 80°C ens proporciona una major extracció de calor, degut a que l'oli a temperatura ambient li costa més arribar a la temperatura d'ebullició, per tant, es troba més temps sense canvi de fase, amb la conseqüent disminució de valor de coeficient de convecció. El valor màxim de coeficient de transferència de calor és $1617,22 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ assolit a una temperatura de 724°C , la mateixa temperatura a la que s'ha aconseguit la velocitat màxima de refredament. Pel que fa a l'oli a temperatura ambient, veiem com el seu coeficient de transferència de calor és menor, amb un valor de $1126,56 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$.

A l'hora d'escalfar l'oli a temperatures superiors a 20°C també s'aconsegueix una disminució de la seva tensió superficial. D'aquesta manera s'afavoreix la formació de bombolles en la superfície de la peça, per tant, s'aconseguiran coeficients d'extracció de calor més elevats.

A l'etapa de convecció, les velocitats de refredament disminueixen i s'igualaven en ambdós casos. Com a conseqüència, veiem com el coeficient de convecció també pateix una disminució important. De tal manera que els seus valor aproximat en aquesta etapa estan compresos en un rang de 100 a $200 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$.

➤ Tremp en aigua salada

El segon fluid que es va utilitzar per a dur a terme els assajos va ser aigua amb una concentració del 23% de sal (NaCl) escalfat a una temperatura de 20°C i 80°C. De la mateixa manera que en l'apartat anterior, a continuació es mostrarà l'efecte que produeix, la temperatura del bany, en aquests assajos en les propietats de transferència de calor pel material A. No obstant, les gràfiques corresponents, i resultats, per als materials B i C es poden trobar en l'Annex C.

Pel cas d'aigua amb sal, un increment de la temperatura del bany produeix una disminució en la severitat del tremp de la mateixa manera que es produiria en l'aigua pura. L'inconvenient que presenta l'aigua (sense sal) és que a temperatures elevades l'etapa de formació de la capa de vapor s'allarga fins a temperatures de la peça baixes, per això, l'aigua amb sal es presenta com la millor alternativa per trempar peces en aigua a temperatures pròximes a la temperatura d'ebullició.

Seguidament es mostren les gràfiques representatives del material A un cop s'ha trempat en aigua amb sal a 20°C i 80°C (Figures 7.18 a 7.20).

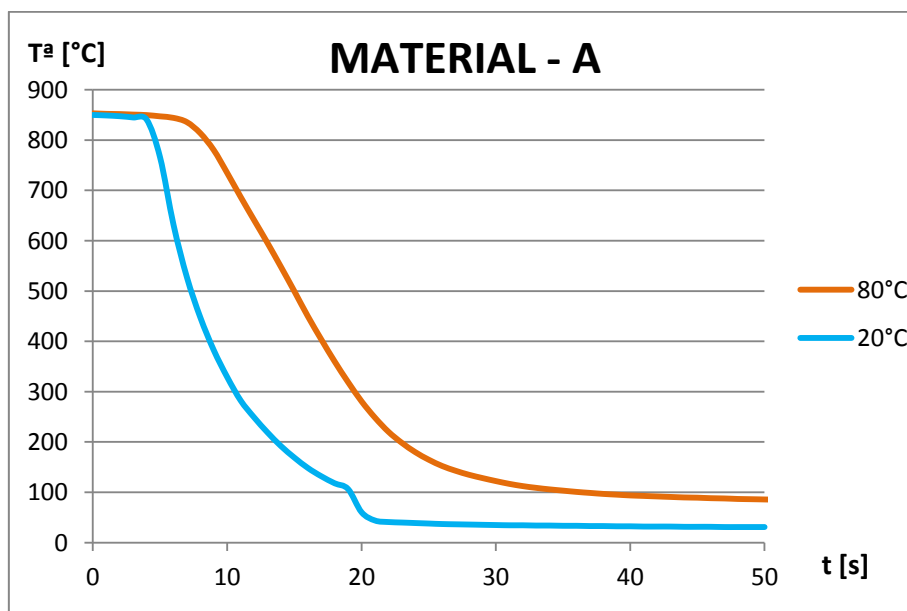


Figura 7-18 Corbes de refredament pel material A trempat en aigua amb sal a 20 i 80°C

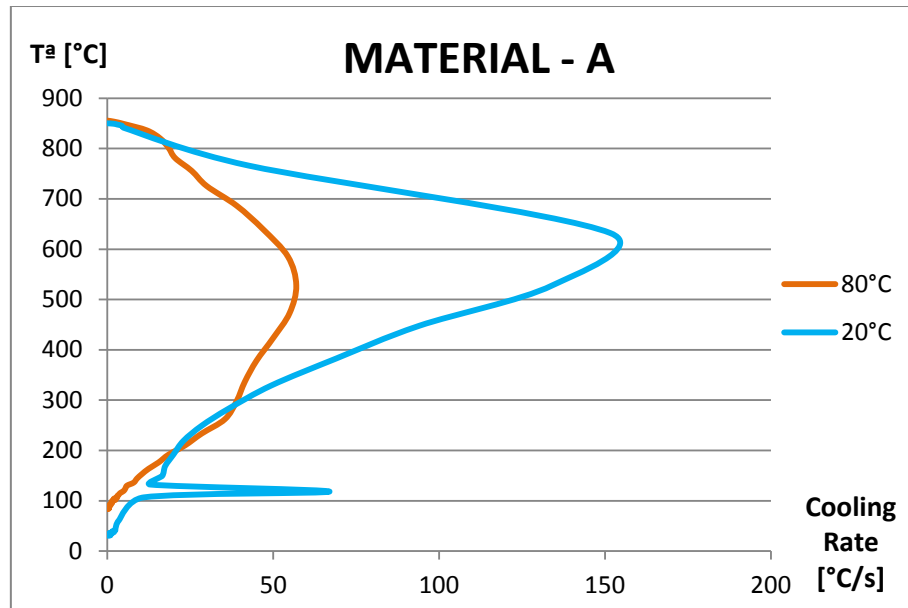


Figura 7-19 Corbes de velocitat de refredament pel material A trempat en aigua amb sal a 20 i 80°C

NOTA: Per a la realització d'aquests assajos no va ser possible l' utilització del datalogger DATAQ DI-718-ES per motius aliens al projecte. Per aquest motiu aquests assajos es van dur a terme amb un datalogger amb menor freqüència de mostreig (1s).

Certament, observant la Figura 7.18 i 7.19, veiem com un augment de temperatura del fluid provoca una caiguda de la velocitat de refredament. Com ja s'ha esmentat anteriorment, al disminuir la severitat del medi de tremp provoquem una disminució de la velocitat de refredament. Per tant, l'extracció de calor s'efectuarà de manera més lenta.

Per a l'assaig a temperatura del bany de 80°C, la màxima velocitat de refredament aconseguida és de 57°C/s a 528°C. En canvi, quan es va realitzar l'assaig amb l'aigua amb sal a temperatura ambient la màxima velocitat de refredament va ser molt superior, assolint una velocitat de 151°C/s a 632°C.

Aquesta gran diferència de velocitats es veu reflectiu en l'extracció de calor produïda en la proveta. La Figura 7.20 mostra quin és el coeficient de convecció per aquests assajos:

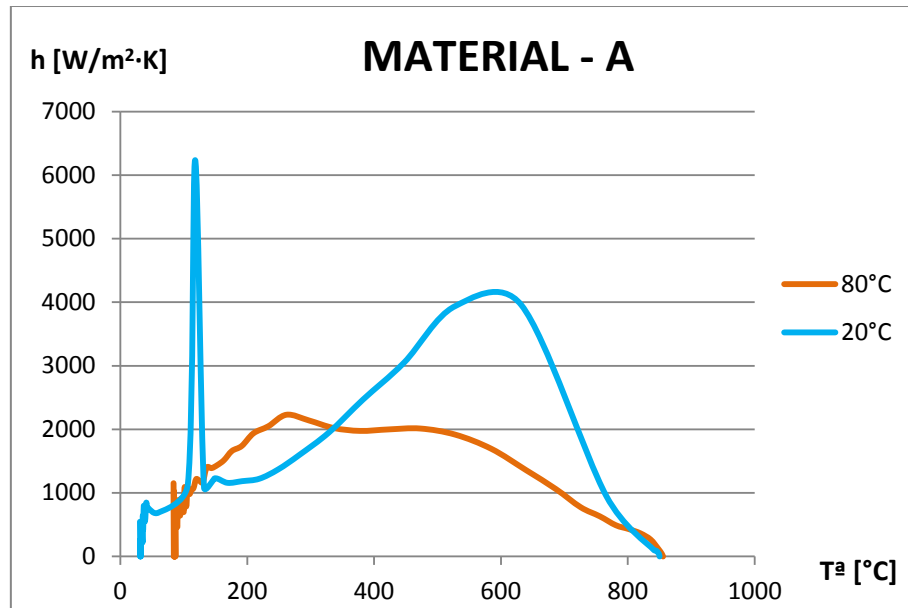


Figura 7-20 Coeficient de transferència de calor pel material A trempat en aigua amb sal a 20 i 80°C

Com es pot comprovar el màxim coeficient de transferència de calor durant el procés de tremp és 6235,61 $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ assolit al voltant dels 120°C. Aquest valor es va donar trempant el material A en aigua salada a temperatura ambient. Pel que fa a l'assaig a temperatura de bany de 80°C, la màxima extracció de calor es va donar a una temperatura de 262°C, i el seu valor és de 2229,42 $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$.

7.1.3. Comparació entre els diferents banys i condicions

L'efecte del tipus de medi sobre la corba de refredament mesurada en el centre del material A es mostra en la Figura 7.21. La velocitat de refredament varia per a cada medi i condició, tal com es pot comprovar en la Figura 7.22.

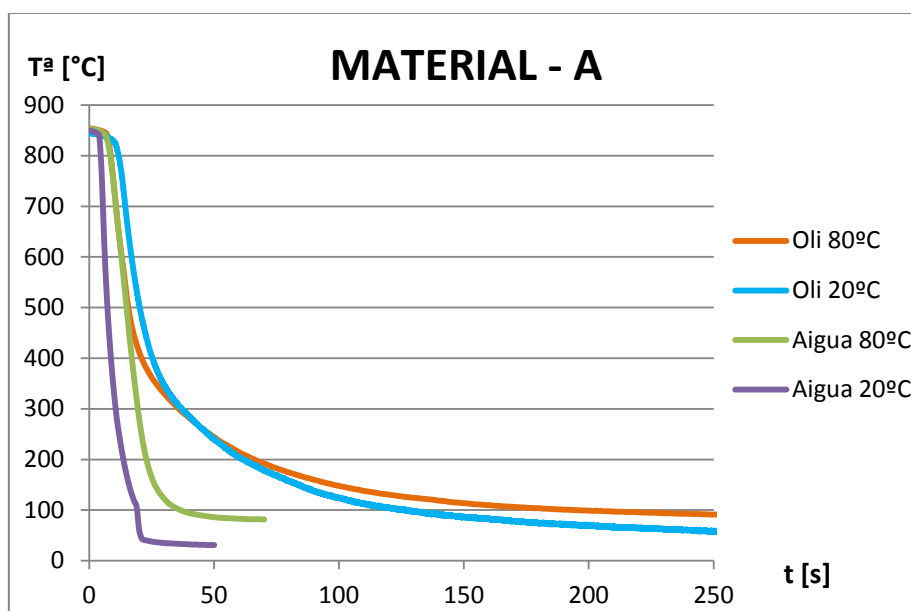


Figura 7-21 Corbes de refredament pel material A trempat en oli i aigua amb sal a 20 i 80°C

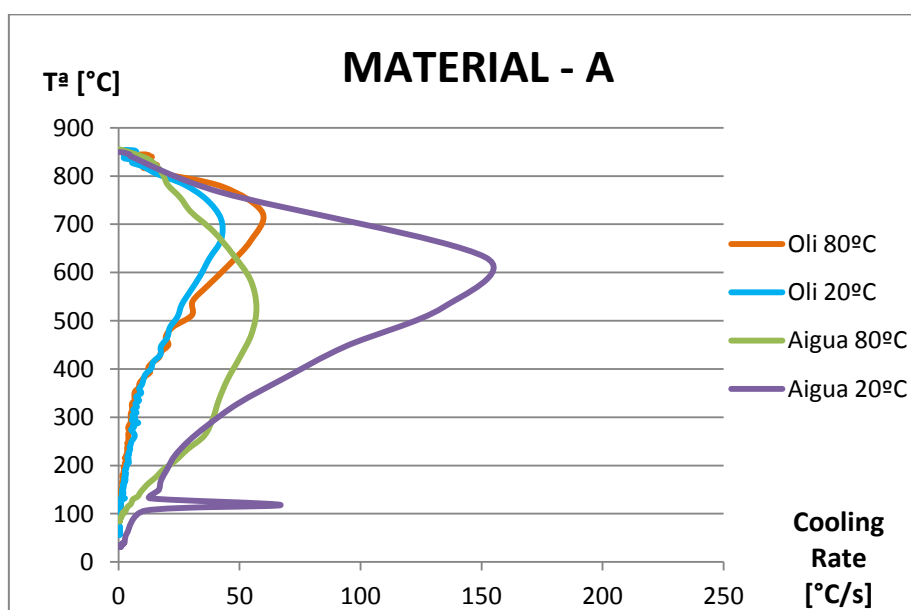


Figura 7-22 Corbes de velocitat de refredament pel material A trempat en oli i aigua amb sal a 20 i 80°C

Les gràfiques comparatives mostren les corbes de refredament i de velocitat obtingudes per al nostre material A per a cada l'oli i l'aigua amb sal a diferent temperatura. Tal com es pot observar en la Figura 7.21, l'aigua amb sal és el medi que ens proporciona un refredament global bastant més ràpid, ja que aproximadament en 50 segons la proveta ja es troba per sota dels 100°C.

Si ens fixem en la Figura 7.22, observem com la velocitat màxima s'assoleix amb l'aigua salada a temperatura ambient. Seguidament, trobem que tant l'oli, com l'aigua, a 80°C ens proporcionen una velocitat de refredament màxima molt semblant. La principal diferència radica en que l'oli a 80°C l'assoleix a una temperatura més elevada, ja que el punt d'ebullició de l'oli és més elevat. Finalment, l'oli a 20°C és el medi que transfereix la calor de manera més lenta degut a que aquesta temperatura presenta una viscositat massa elevada.

Seguidament es mostra la comparació entre els diferents coeficients de transferència de calor obtinguts (Figura 7.23).

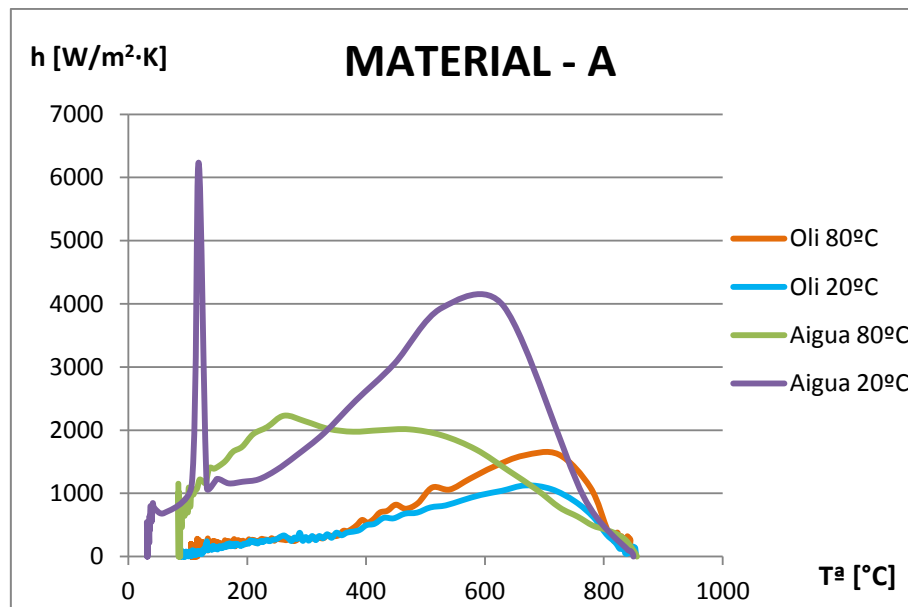


Figura 7-23 Coeficient de transferència de calor pel material A trempat en oli i aigua amb sal a 20 i 80°C

Observant aquest figura es veu clarament les diferències existents entre els diferents fluids. El coeficient de transferència de calor més elevat s'obté amb l'aigua salada a temperatura ambient, seguit de l'aigua a 80°C, i l'oli a 20°C. Com era d'esperar, l'oli a 20°C és el medi que menys extracció de calor ens proporciona.

El tremp en aigua amb sal ofereix una extracció de calor superior a l'oli. Per això, quan ens trobem a temperatures properes a la transformació martensítica la possibilitat d'aparició de distorsió i esquerdes augmenten considerablement, amb el conseqüent rebuig de la peça tractada. A més a més, un del problemes més comuns d'aquest medi

és la corrosió que provoca en la peça i l'equip d'assaig. Per això cal prevenir, amb unes precaucions especials, elements com ara forn, termoparells i agitadors entre d'altres.

A l'Annex C es poden trobar les figures corresponents a la resta de materials d'estudi B i C.

7.1.4. Comparativa amb les correlacions de la literatura

Finalment, es realitza un estudi comparatiu entre les dades experimentals obtingudes i les dades calculades amb les correlacions esmentades en l'apartat 5.2.4 . L'objectiu principal d'aquesta comparació és observar la validesa de les correlacions bibliogràfiques prenent com a base l'experimentació duta a terme.

Per dur a terme l'estudi, es va realitzar una recerca bibliogràfica per a tenir coneixement dels valors de les propietats físiques de cada fluid d'estudi a cada temperatura, com per exemple, calor latent de vaporització, densitat del fluid en fase líquid i vapor, viscositats dels medis, tensió superficial i calors específics, entre d'altres.

Cal esmentar que pels assajos en aigua, no va haver cap tipus d'inconvenient per a trobar els valors bibliogràfics necessaris per a la realització dels càlculs. Per contra, l'oli destinat al tractament tèrmic és un fluid que no presenta tanta facilitat en la recerca de les seves propietats. Generalment, a excepció dels olis lubricants de tremp, els olis no pateixen vaporització. Sinó que es degraden i acaben cremant-se a altes temperatures. Cal destacar que no tots els valors emprats en el càlcul per a l'oli assajat corresponen específicament a aquest oli de tremp, sinó que s'han pres valors d'altres olis lubricants destinats a la indústria. La finalitat de l'estudi consisteix en estimar un valor de coeficient de convecció teòric amb les dades bibliogràfiques, i no determinar experimentalment els valors pels paràmetres desconeguts de l'oli emprat. Com a conseqüència, és d'esperar que els resultats teòrics no s'ajustin de la manera més precisa.

Un cop recopilades totes les dades necessàries, es procedeix al càlcul del coeficient de convecció per a cada etapa de refredament mitjançant el càlcul promig de diferents valors obtinguts durant l'etapa corresponent. Aquest valor es compara amb el promig experimental obtingut a partir de l'experimentació. Per veure el marge d'error existent

entre ambdós valors amb més claredat, i observar la desviació obtinguda, es calcula l'error absolut.

La Taula 7.5 i la Taula 7.6 presenten els resultats obtinguts per a cada medi i mètode, amb el error absolut assolit.

			h [W/m ² ·K]		
			<i>Eb. Pel·lícula</i>	<i>Eb. Nucleada</i>	<i>Convecció</i>
OLI	80°C	Experimental	249,98	946,46	129,01
		<i>Teòric</i>	64,65	-	108,53
		Error [%]	74,14	-	15,87
	25°C	Experimental	107,48	723,76	109,16
		<i>Teòric</i>	62,61	-	94,78
		Error [%]	41,75	-	13,18

Taula 7-5 Comparativa entre el coeficients de convecció teòrics i experimentals per a l'oli a diferents temperatures

NOTA: Després de realitzar una recerca exhaustiva per a les dades bibliogràfiques de l'oli, no va ser possible trobar els valors de les pressions de saturació a diferents temperatures, els quals són necessaris pel càlcul del coeficient de convecció en l'etapa d'ebullició de pel·lícula.

			h [W/m ² ·K]		
			<i>Eb. Pel·lícula</i>	<i>Eb. Nucleada</i>	<i>Convecció</i>
AIGUA amb sal	80°C	Experimental	43,43	1444,01	486,21
		<i>Teòric</i>	22,54	5470,71	539,95
		Error	48,09	>100	11,05
	25°C	Experimental	15,21	1939,79	481,50
		<i>Teòric</i>	22,55	5748,03	429,65
		Error	48,27	>100	10,77

Taula 7-6 Comparativa entre el coeficients de convecció teòrics i experimentals per a l'aigua amb sal a diferents temperatures

Com es pot observar en ambdues taules, aquelles etapes de refredament on es produeix un canvi de fase del medi fluid (ebullició de pel·lícula i nucleada) són molt difícils de caracteritzar teòricament. Això es degut a la complexitat del seu mecanisme de refredament, el qual no permet obtenir unes correlacions que s'aproximin de

manera precisa i exacta al resultat experimental. Com a conseqüència, s'obtenen uns resultats amb un errors absoluts elevats.

Més específicament, si ens fixem entre l'etapa d'ebullició de pel·lícula i l'etapa nucleada, observem com la correlació de la primera d'aquestes descriu de millor manera el procés que es dona, tot i que presenta un error absolut al voltant del 50%. En canvi, la correlació per l'etapa d'ebullició nucleada, tal com s'ha comentat en la literatura, no ens garanteix un resultat pròxim a l'experimental, ja que el seu error absolut supera el 100%.

Com a primera conclusió, podem concloure que per aquestes primeres etapes de refredament en que es produeix canvi de fase, és necessari dur a terme l'experimentació per tal de determinar el coeficient de convecció que s'arriba a aconseguir durant el procés.

Pel que fa a l'última de les etapes de refredament (etapa de convecció), observem com per aquest cas, les correlacions sí que ens poden determinar, aproximadament, un coeficient de convecció que caracteritzi el procés. Per aquesta etapa, la inexistència de canvi de fase del fluid de tremp facilita, de manera notable, la descripció i el càlcul del procés. Com a conseqüència l'error absolut assolit en aquesta etapa per ambdós fluids es troba sobre un 10-15%, el qual el podem considerar acceptable.

7.2. Cas d'estudi material A

Mitjançant la realització de l'estudi de la primera part, seguint en la mesura de lo possible la normativa ISO9950, va ser possible determinar la capacitat d'extracció de calor en els nostres acers per a cadascun del medis caracteritzats. D'aquesta manera tenim la suficient informació per intuir quin dels medis ens proporcionarà una major transferència de calor i sota quines condicions. No obstant, l'assoliment de la major velocitat de refredament no implica la imposició de que aquell medi sigui el més apropiat en tots el casos, ja que existeixen moltes altres variables que poden afectar al tremp en qüestió. Les principals variables que es van variar per a la realització d'aquesta segona part van ser la geometria de la peça, la temperatura de la peça d'inici del tremp i l'agitació aportada en el procés.

Tot i així, gràcies a l'obtenció dels coeficients de transferència de convecció per a cada etapa de refredament, és possible realitzar una predicció aproximada sobre l'evolució tèrmica que pateix la superfície dels blocs que s'experimenten en el projecte.

La temperatura d'assaig del blocs va ser de 1020°C, assegurant una temperatura homogènia en tota la peça. De la mateixa manera que en la primera part del projecte, els fluids de tremp emprats en aquest estudi van ser oli i aigua salada a temperatures de 80°C i temperatura ambient. Pels tremps en oli es va utilitzar un tanc de 3000 litres aproximadament, en canvi, els tremps en aigua es van dur a terme en un tanc de 117 litres.

L'objectiu principal d'aquest segon estudi consisteix en determinar les corbes de refredament per a cadascun dels punts d'interès (superfície, punt intermig i nucli), i observar la penetració de tremp aconseguida, mitjançant la duresa assolida en cada punt, per diferents condicions i fluids de tremp.

A continuació es mostren els resultats obtingut pels 4 tremps realitzats durant l'elaboració del projecte.

7.2.1. Resultats experimentals

El resultat que es mostra per a cada experimentació es mostra mitjançant la representació de la corba de refredament obtinguda. La corba de velocitat de refredament es calcula de la mateixa manera que en la primera part del projecte.

Com ja hem esmentat anteriorment, per a aquests assajos es van duplicar els termoparells de les peces per tal d'assegurar un bon registre. Les figures representades a continuació mostren les corbes dels termoparells situats en la paret superior de la peça. En el cas en que algun dels termoparells superiors no registrin bé les dades, llavors es mostraria la corba corresponent al lateral de la peça.

➤ Oli a 80°C

La Figura 7.24 i 7.25 mostra les corbes de refredament i velocitats de refredament assolides en cadascun dels punts de control de la peça pel tremp en oli a 80°C.

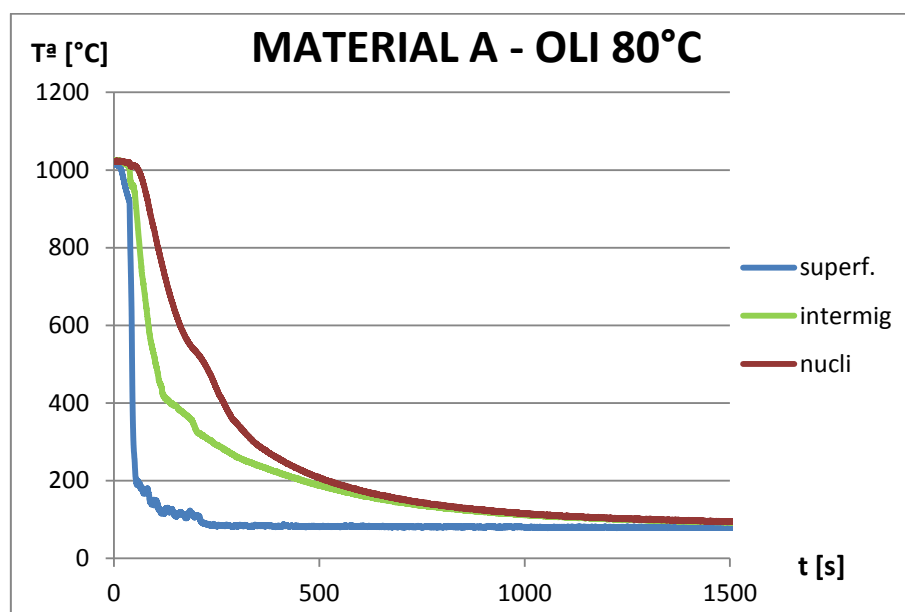


Figura 7-24 Corbes de refredament en la superfície, punt intermig i nucli pel material A trempat en oli a 80°C

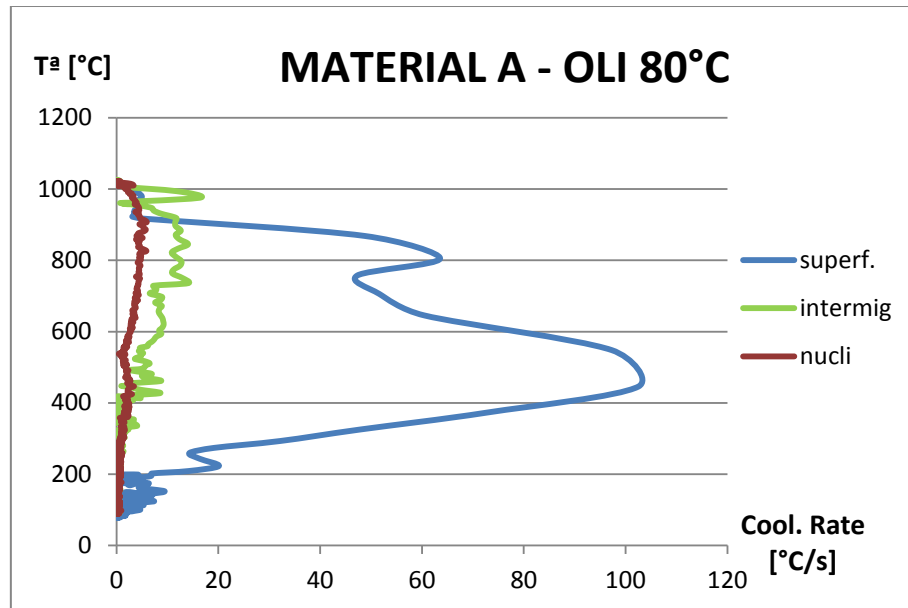


Figura 7-25 Corbes de velocitat de refredament en la superfície, punt intermig i nucli pel material A trempat en oli a 80°C

Com era d'esperar, si ens fixem en ambdues figures, observem com el punt que es refreda més ràpidament és el que es troba més a prop de la superfície. Seguidament, es troba el punt intermig i el nucli respectivament. Lògicament, el nucli és el punt de la peça que presenta la velocitat d'extracció de calor més lenta degut a la massa de material que el separa del fluid de refredament.

Si ens fixem en la corba de velocitat de refredament corresponent a la superfície (Figura 7.25) veiem com es donen els 3 mecanismes de refredament dels que parlem durant tot el treball. La primera etapa o etapa d'ebullició de pel·lícula es dona entre unes temperatures compreses entre 1020 i 915°C, i són necessaris 37 segons per a superar-la. La velocitat promig assolida en aquesta primera etapa és relativament lenta degut a l'efecte aïllant que produeix la capa de vapor que envolta la peça (2,62°C/s).

A la segona etapa de refredament o d'ebullició nucleada s'assoleixen les velocitats més elevades de tot el procés. Lògicament, la superfície és el punt que aconsegueix la velocitat més elevada entre els 3 punts registrats. El seu valor màxim és de 102,51°C/s, i supera a en gran mesura als 16,76°C/s registrats pel punt intermig, i els 5,93°C/s assolits pel nucli.

Un cop s'han donat les velocitats de transferència de calor més elevades, entrem en l'última de les etapes de refredament o etapa de convecció. En aquest punt el líquid mulla completament la peça i es pateix una disminució de velocitat, ja que la calor s'extreu completament mitjançant el fenomen de convecció sense canvi de fase entre la peça i el fluid. Aquesta etapa s'inicia al voltant dels 175°C registrats en la superfície. A partir d'aquest moment el punt més proper a la superfície assoleix una velocitat promig de 1,96°C/s. En canvi, per al punt intermig i el nucli, l'extracció de calor és tan lenta que gairebé no s'observa diferència entre les seves velocitats ($\approx 0,60^\circ\text{C/s}$).

Finalment, la Figura 7.26 mostra les corbes de refredament assolides en els diferents punts d'estudi superposades en el diagrama TTT corresponent a aquest material A. Tal com s'ha comentat en la bibliografia del projecte, el diagrama TTT mostra d'una manera representativa la transformació que té lloc durant el procés de refredament. És a dir, permet estimar quines transformacions microestructurals s'estan donant en la peça trempada.

Generalment, l'objectiu és evitar entrar en les dues zones més característiques del diagrama TTT per aconseguir el nostre objectiu de microestructura martensítica completa. A temperatures elevades es troba el nas perlític o d'inici d'estructura perlítica, i a temperatures inferiors es troba el nas bainític o d'inici de transformació bainítica. Els nassos queden representats en la següent Figura 7.26, les línies en negre descriuen l'inici (línia de l'esquerra) i el final (línia de la dreta) de la transformació corresponent.

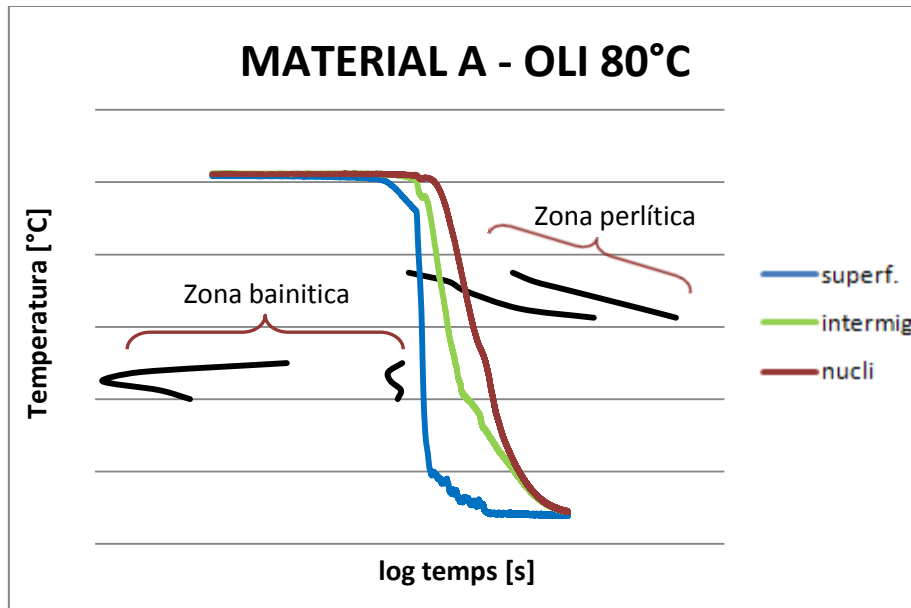


Figura 7-26 Diagrama TTT amb les corbes de refredament superposades per a la superfície, punt intermig i nucli del material A trempat en oli a 80°C

NOTA: Per temes de confidencialitat no es mostren els eixos corresponents a la temperatura i temps del diagrama TTT.

Si ens fixem en la Figura 7.26 observem com utilitzant oli a 80°C com a fluid de tremp no som capaços d'evitar entrar en el nas perlític, ja que totes tres corbes entren en aquesta zona. Com a conseqüència, obtenim una alta probabilitat de formació de microestructura perlítica. No obstant, la superfície traspasa aquesta zona més ràpidament, per tant, és d'esperar que la formació de perlita sigui d'una magnitud menor en comparació amb el nucli.

Pel que fa al nas bainític veiem com les tres corbes eviten entrar en el seu rang corresponent, ja que el refredament s'ha produït de tal manera que les corbes no traspassen aquesta zona. Per tant, les probabilitats de formació bainítica disminueixen considerablement.

Un cop finalitzat el tremp es revisa la peça per veure com ha afectat aquestes condicions de tremp en el nostre acer. Un primer estudi inicial consisteix en observar l'aparició d'alguna esquerda en el material, ja que en cas afirmatiu, aquesta peça no seria apta per a servir a cap client. Cal esmentar, que sota aquestes condicions de tremp, aparentment no s'ha produït cap esquerda en el material. Seguidament, i un

cop la peça es troba al laboratori, es pren nota d'una de les seves propietats mecàniques assolides, la duresa. Per a mesurar aquesta propietat és necessari el tall d'una llesca del centre del bloc per tal de realitzar un perfil de duresa. Per a un tremp en oli, amb temperatura del bany de 80°C, i mitjançant l'utilització d'un duròmetre EASYDUR, la duresa inicial aconseguida és de 50HRC per a la superfície, i 45HRC pel nucli. Com es pot observar existeix una diferència de 5HRC entre aquests dos punts, corroborant la nostra hipòtesi de que a la superfície s'haurà format més martensita, ja que presenta una duresa més elevada.

Les unitats HRC corresponen al nom de duresa Rockwell, el qual consisteix en un mètode per calcular la duresa del material. El nom de la duresa Rockwell es denota com HR seguit de la lletra C, que correspon a l'escala utilitzada per la seva mesura. En el nostre cas s'ha utilitzat una escala C corresponent a l'indentador en forma de con amb punta de diamant, el qual s'acostuma a utilitzar per a mesurar acers trempats.

En conclusió, aquest bloc no tindrà una microestructura martensítica completa, ja que el grau de formació de martensita disminuirà a mesura que ens apropem al centre de la peça. És d'esperar que el tant per cent de formació martensítica més elevat es doni en la superfície de la peça, mentre que la mínima formació es trobi en el nucli.

➤ Oli a temperatura ambient

Si ens fixem en els resultats obtinguts durant la primera part del projecte, observem que l'assaig en oli a temperatura ambient és el medi i la condició que menys extracció de calor ens ofereix entre la peça i el líquid. Per aquest motiu és d'esperar que en el present apartat s'obtingui una velocitat de transferència de calor menor en comparació amb l'oli a 80°C.

La Figura 7.27 i 7.28 mostra les corbes i velocitats de refredament corresponents obtingudes pel bloc assajat en oli a temperatura ambient.

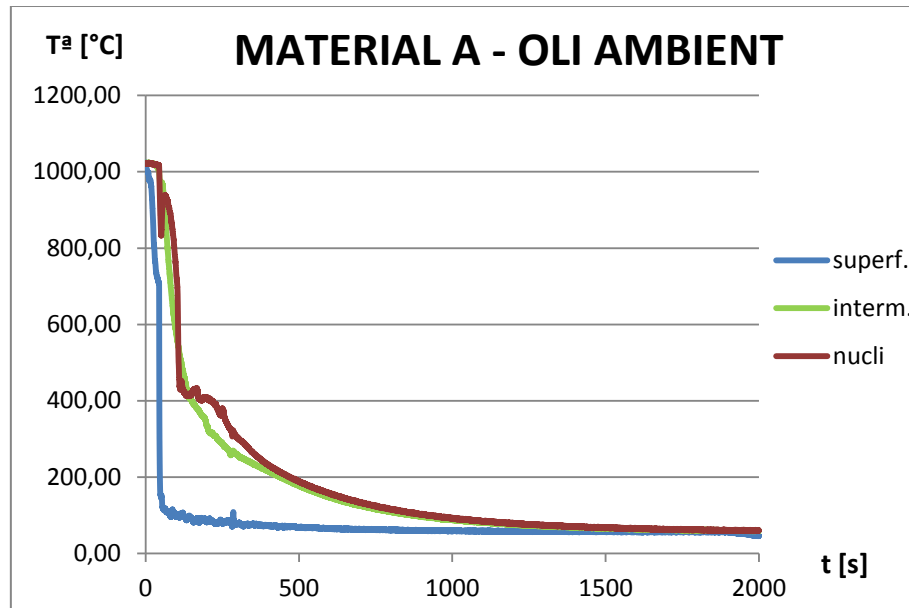


Figura 7-27 Corbes de refredament en la superfície, punt intermig i nucli pel material A trempat en oli a temperatura ambient

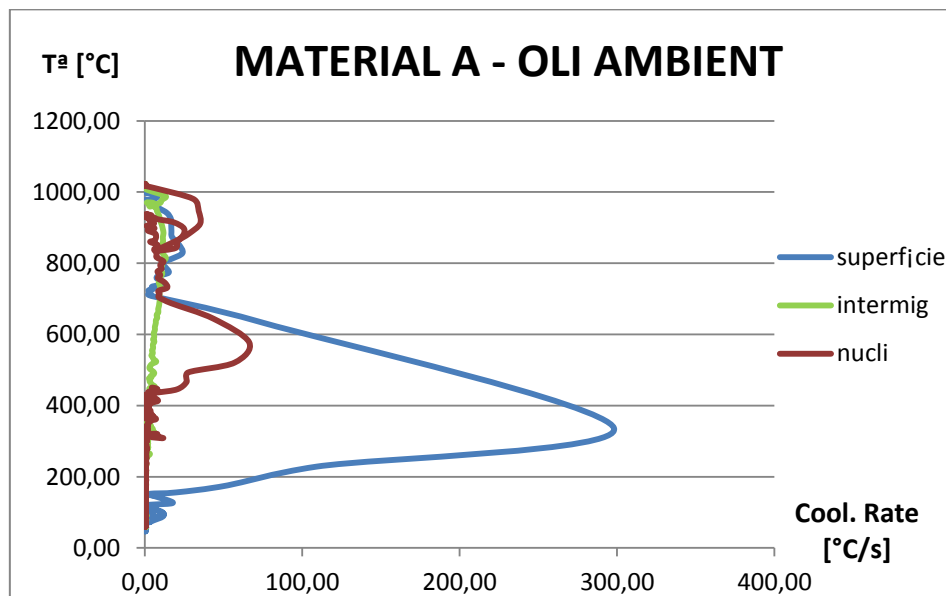


Figura 7-28 Corbes de velocitat de refredament en la superfície, punt intermig i nucli pel material A trempat en oli a temperatura ambient

A l'hora d'estudiar les dades registrades per aquest assaig (Figura 7.27 i Figura 7.28) s'observa clarament com la corba de refredament i de velocitat de refredament pel nucli es surt de la seva forma habitual. Més específicament, la corba de refredament té una pendent bastant pronunciada que deriva en una velocitat de refredament fluctuant i més elevada de lo habitual (supera la velocitat del punt intermig). El motiu

d'aquest comportament es pot donar per varies raons, la suma de les quals poden afectar en certa manera al refredament obtingut. Per començar, l'assaig a temperatura ambient no es va realitzar a una temperatura propera als 20°C. Segons el termoparell encarregat de controlar la temperatura de l'oli l'assaig es va iniciar quan l'oli encara es trobava a 50°C, per tant, la seva viscositat era més baixa de lo habitual i provoca un petit augment en la velocitat de refredament de la peça. Una segona raó ve donada per l'agitació aportada al sistema, la qual pot haver sigut major que l'agitació aportada en l'assaig amb oli a 80°C. Finalment, i la raó amb més sentit, el termoparell pot haver-se sortit parcialment degut a algun moviment brusc o a la pròpia agitació, i com a conseqüència, es van registrar dades que no eren reals. A més a més, el termoparell lateral encarregat del registrament, tant del nucli com de la superfície, es va instal·lar amb la polaritat creuada i tampoc es van registrar les dades correctament.

També, si ens fixem en la velocitat màxima aconseguida per la superfície, observem que triplica el valor aconseguit en l'assaig anterior. Per tant, estem davant d'un resultat molt poc fiable. La següent Figura 7.29 mostra aquests comportaments anòmals tant pel nucli com per la superfície en comparació amb l'assaig en oli a 80°C.

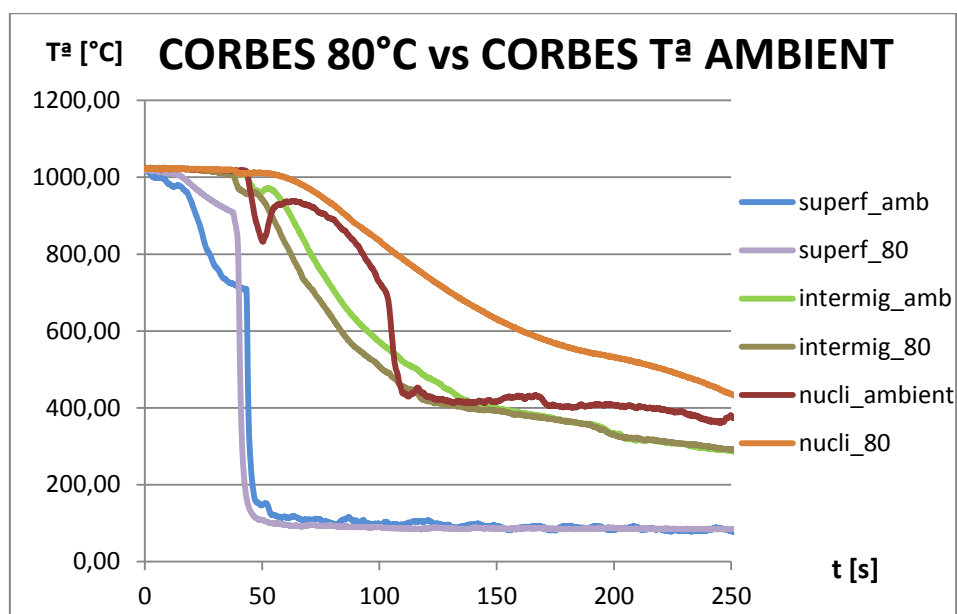


Figura 7-29 Comparació de les corbes de refredament en la superfície, punt intermig i nucli pel material A trempat en oli a temperatura ambient i 80°C

Si ens fixem en la figura anterior observem com inicialment, en el rang de temperatura de 1020 a 700°C, la corba de refredament de la superfície de la peça assajada en oli a temperatura ambient (blau) és molt més ràpida que la corba de la superfície en oli a 80°C (lila). Seguidament, la corba blava presenta una pendent molt pronunciada que deriva en una velocitat de refredament molt ràpida. Es podria suposar que en aquest punt el termoparell de la superfície ja es troba totalment fora de la peça. Més clarament es veu aquesta diferència en la corba de refredament del nucli, on la corba del nucli de la peça trempada en oli a temperatura ambient (vermell) és, en tot moment fluctuant, i més ràpida que la corba del nucli de la peça trempada en oli a 80°C (taronja). Per tant, segurament el termoparell s'hagi sortit al principi de l'assaig.

Tot i que els termoparells es van posar dobles per a cada punt de la peça, durant el procés d'aquest tractament tèrmic es van perdre els canals "reserves" per a la superfície i el nucli. Com a conseqüència no podem donar aquests resultats com a bons, ja que difereixen molt dels resultats esperats. Caldria repetir l'assaig o treure conclusions a partir de les propietats mecàniques obtingudes després de l'assaig.

Teòricament, una velocitat menor de refredament ens ha d'aportar una duresa menor en la nostra peça, ja que el grau de martensita produït és inferior que quan el refredament es dona de manera més ràpida. En l'assaig del bloc de material A a temperatura ambient de l'oli, esperàvem velocitats de refredament menors en comparació amb l'assaig a temperatura de 80°C, per tant, és d'esperar que un cop finalitzat el tremp les dureses obtingudes siguin menors també.

Si prestem especial atenció a les dureses aconseguides un cop s'ha realitzat el tremp, el resultats són satisfactoris, ja que la duresa obtinguda per a la superfície és de 46HRC (4HRC menors que l'obtinguda en l'assaig anterior), i pel nucli 42HRC (3 punts inferiors).

Com a conclusió podem extreure que no solament les propietats tèrmiques ens permeten caracteritzar un material, tal com s'ha avançat en el Capítol 2, sinó que, com en aquest cas, un estudi de les propietats mecàniques després del tremp també ens poden aportar una informació rellevant.

➤ Aigua salada a 80°C

Per a la realització dels assajos en aigua salada va ser necessari la fabricació d'un nou tanc amb una capacitat aproximada de 117 litres d'aigua. Durant la fabricació del tanc per part dels operaris de Roalma S.A., es va comprar un agitador AGITASER, amb una velocitat de rotació de 1420 rpm, per instal·lar-lo conjuntament en el tanc. Es va afegir un total de 27kg de sal fina per tal d'aconseguir una concentració del 23% en el nostre fluid de tremp. El resultat final es mostra en la següent imatge (Figura 7.30):



Figura 7-30 Tanc amb agitador instal·lat per dur a terme els assajos en aigua salada

Un cop el tanc estava preparat es va procedir a l'escalfament de l'aigua mitjançant l'ús d'una resistència portàtil. Quan es va assolir la temperatura desitjada, mitjançant el seu control amb un termoparell exterior, es van iniciar els assajos.

La Figura 7.31 i 7.32 mostren els resultats obtinguts pel tremp en aigua salada a temperatura de 80°C.

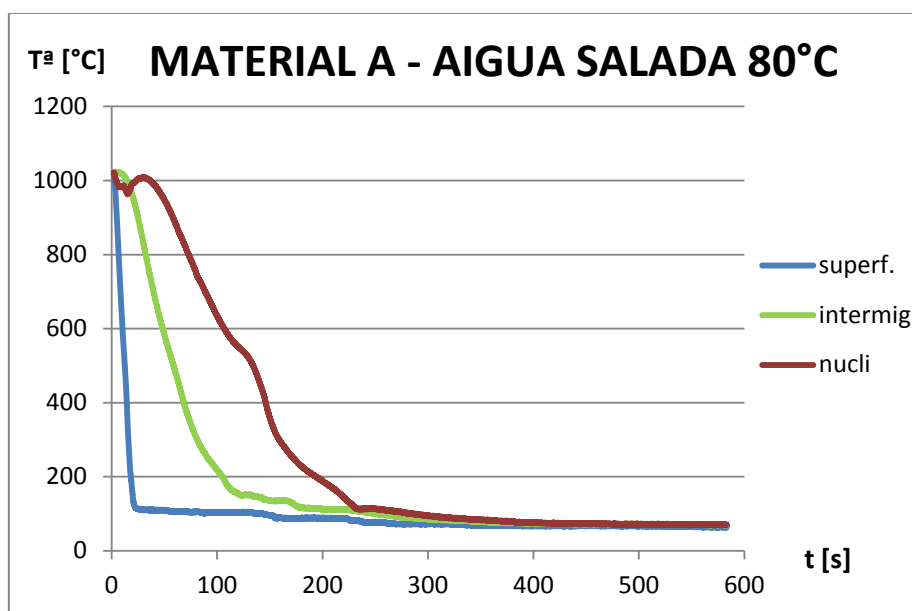


Figura 7-31 Corbes de refredament en la superfície, punt intermig i nucli pel material A trempat en aigua salada a 80°C

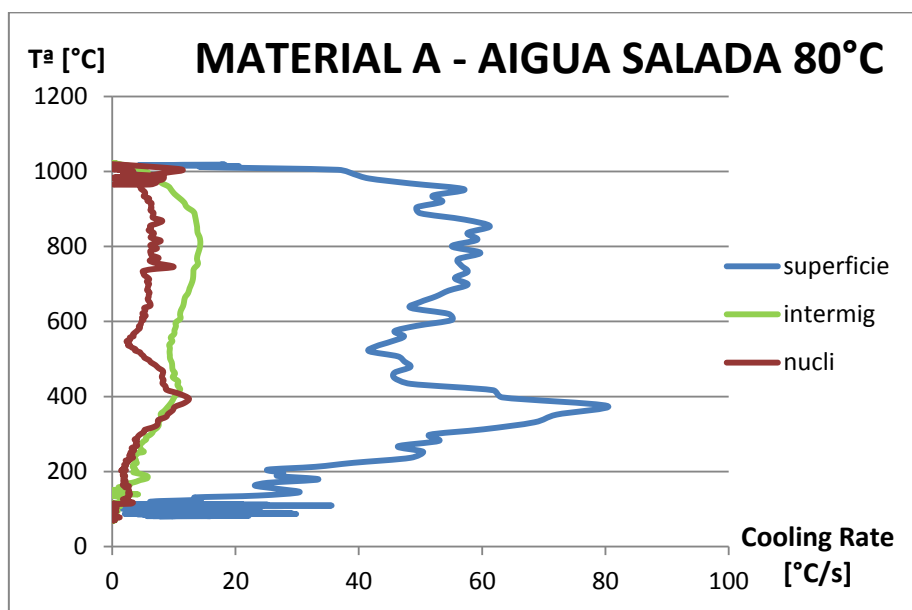


Figura 7-32 Corbes de velocitat de refredament en la superfície, punt intermig i nucli pel material A trempat en aigua salada a 80°C

A l'hora d'iniciar el tremp en aigua salada es va notar que l'agitació no era lo suficientment alta com per aconseguir una velocitat de refredament lo màxima possible. A més a més, al principi de l'experimentació un dels termoparells que registraven la temperatura de la peça es va enrotllar amb l'aspa de l'agitador

provocant el bloqueig d'aquest. Com a conseqüència, l'agitació aportada va ser mínima i el tremp no es va realitzar de la manera més ideal possible.

Aquestes incidències van tindre els seus efectes en les corbes de refredament registrades. Com es pot observar en la Figura 7.31, l'aigua a 80°C ens proporciona un tremp sever que ja des de un principi inicia un refredament relativament ràpid. De nou, es corrobora que la superfície és el punt que pateix un refredament més ràpid seguidament del punt intermig i del nucli.

Gràcies a l'efecte de la sal, a l'agitació, i a la temperatura del bany, si ens fixem en la corba de la superfície a la Figura 7.32 observem com l'etapa de formació de la capa de vapor s'escurça fins a una temperatura de 520°C, degut a que la sal evita parcialment la formació de bombolles en la superfície. De fet, són necessaris 42,71 segons per iniciar l'etapa d'ebullició nucleada a una temperatura aproximada de 500°C. La velocitat promig aconseguida en la superfície durant aquesta etapa és de 43,89°C/s.

Quan s'inicia l'etapa d'ebullició nucleada el datalogger registra de nou un augment en les velocitats de refredament. Malauradament, no són les velocitats que es pretenien assolir degut a la falta d'agitació. De totes maneres, s'observa perfectament com la superfície obté una velocitat de refredament màxima de 80,29°C/s a una temperatura de 375°C. La resta de punts, com era d'esperar mostren unes velocitats molt menors en comparació amb la superfície. El punt intermig, per exemple, mostra una velocitat màxima de 14,32°C/s al voltant dels 800°C. En canvi, el nucli presenta la menor velocitat de refredament de 12,45°C/s al voltant dels 395°C. Com es pot comprovar, el volum i espessor de les peces tenen una gran importància en el tremp dels acers. La capa exterior serà aquella que es refreda abans, ja que es troba en contacte amb el líquid. El punt intermig es refreda amb menys rapidesa ja que la calor no es transmet directament amb el líquid sinó que ha d'atravessar primer la capa superficial de l'acer. I finalment, el nucli es refreda encara més lentament, ja que contra més a l'interior et trobes, més difícil és la transmissió de calor.

Finalment, i com la resta d'assajos, en l'etapa final de refredament o de convecció es pateix una disminució de les velocitats de refredament. En aquest cas, la superfície ha

assolint una velocitat aproximada de $0,50^{\circ}\text{C/s}$, en canvi, el punt intermig i el nucli presenten velocitats una mica menors, $0,35^{\circ}\text{C/s}$ i $0,32^{\circ}\text{C/s}$ respectivament.

Si ens fixem en el diagrama TTT pel nostre material A amb les seves corbes de refredament superposades, podem estimar com ha evolucionat el refredament de la nostra peça durant el tractament tèrmic aplicat (Figura 7.33).

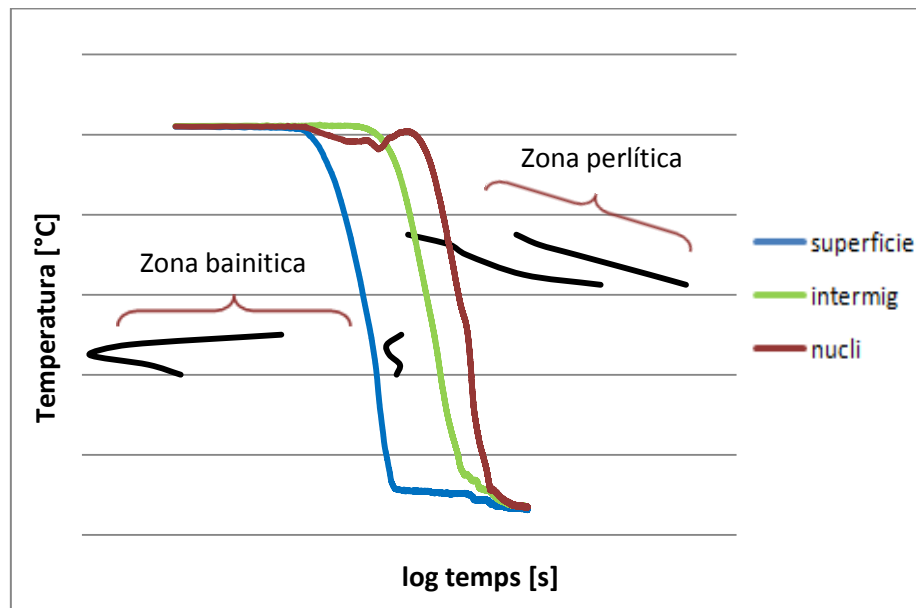


Figura 7-33 Diagrama TTT amb les corbes de refredament superposades per a la superfície, punt intermig i nucli del material A trempat en aigua salada a 80°C

NOTA: Per temes de confidencialitat no es mostren els eixos corresponents a la temperatura i temps del diagrama TTT.

Com es pot observar, la corba de la superfície és capaç d'evitar entrar en la zona de formació perlítica. Però a temperatures inferiors veiem com s'introdueix de ple en la zona bainítica, per tant, és d'esperar que en la superfície final del bloc trempat s'hagi produït la formació de bainita, amb la conseqüent obtenció d'una duresa superior.

Pel que fa a la resta del bloc (intermig i nucli) veiem com les seves corbes entren a la zona de formació de microestructura perlítica, és a dir, a l'interior de la peça haurem obtingut una formació parcial de perlita juntament amb la martensita.

A l'hora de realitzar un primer estudi visual de la peça, es veu clarament com l'aigua et permet aconseguir velocitats molt ràpides en la peça, però també és un medi molt

sever que pot afectar a certs punts geomètrics de la peça. En els nostre cas es veu reflectit en el punts crítics que vam introduir a l'hora de mecanitzar els blocs. Un cop vam treure la peça de l'aigua salada a 80°C es va veure la formació d'una esquerda de grans dimensions que afectava a gran part de la superfície (Figura 7.34).



Figura 7-34 Esquerda produïda sobre un dels punts crítics quan s'ha trempat en aigua salada a 80°C

Finalment, i per acabar l'estudi inicial d'aquesta peça, es mira la duresa obtinguda, a partir d'una llesca del seu interior. Segons el duròmetre EASYDUR, la duresa en un punt més proper a la superfície és de 54HRC, m'entres que al nucli és de 51 HRC. Les dureses són més altes en comparació amb les obtingudes en els assajos en oli, ja que l'aigua salada és un medi molt més energètic que fa possible la formació de bainita en la superfície, i el refredament en el nucli es produeix de manera més ràpida. A més a més, tornem a comprovar que la superfície, la qual ha obtingut un refredament més elevat, obté una duresa major en comparació amb el nucli, el qual ha tingut un refredament més lent.

➤ Aigua salada a temperatura ambient

L'últim dels resultats que es presenten són els obtinguts pel tremp en aigua a temperatura ambient. El tremp es va realitzar de la mateixa manera que l'anterior, solament que es va afegir un agitador més, el qual es manipulava mitjançant un taladro des de l'exterior. L'objectiu d'aquest agitador extra consisteix en generar més turbulència i afavorir la transferència de calor entre la peça i l'aigua.

Els resultats obtinguts es mostren en les següents figures (Figura 7.35 i Figura 7.36).

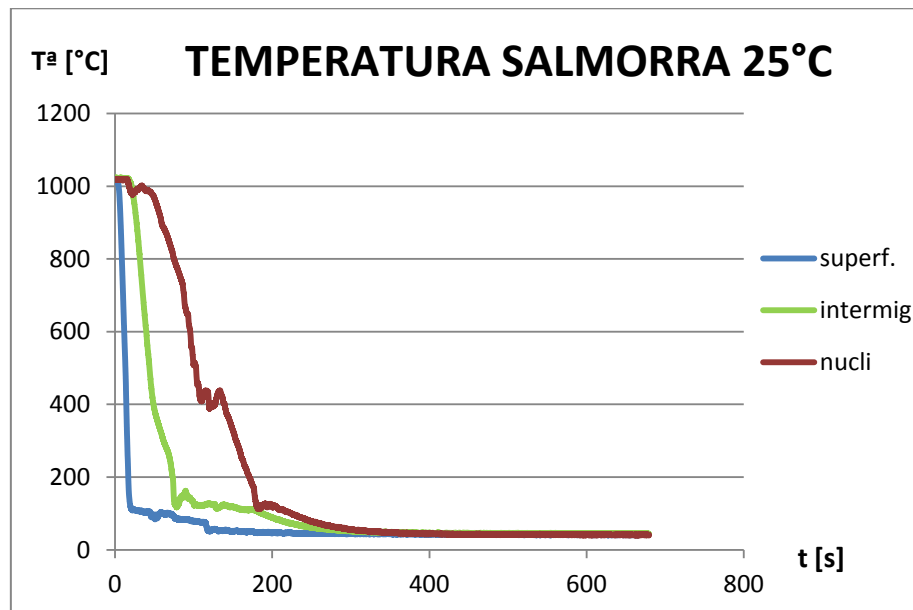


Figura 7-35 Corbes de refredament en la superfície, punt intermig i nucli pel material A trempat en aigua salada a temperatura ambient

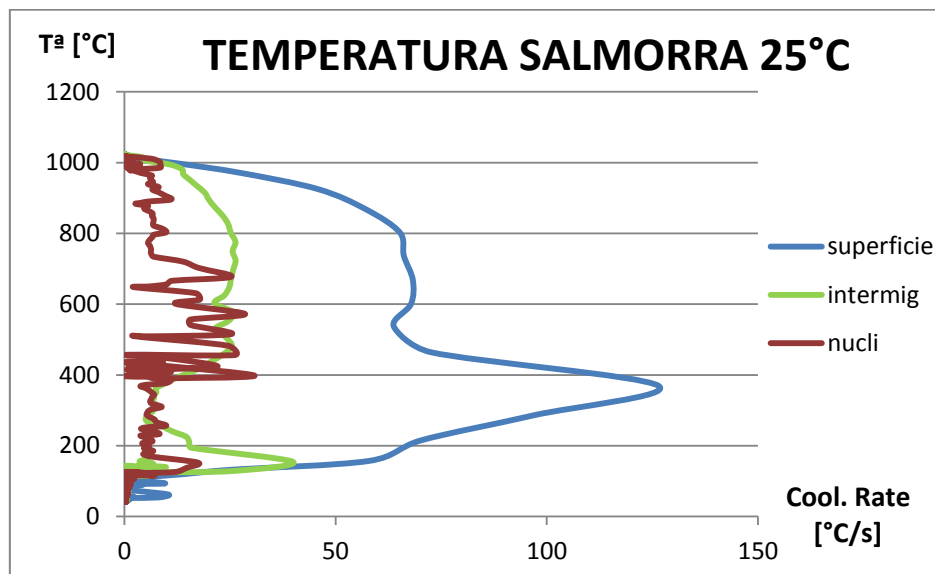


Figura 7-36 Corbes de velocitat de refredament en la superfície, punt intermig i nucli pel material A trempat en aigua salada a temperatura ambient

Tal com es pot observar en ambdues figures, la principal diferència que caracteritza aquest assaig es que les velocitats en tots tres punts són bastant elevades. En aquest cas, el temps necessari per superar l'etapa de refredament per ebullició de pel·lícula és de 24 segons a una temperatura de 536°C.

De nou, la superfície aconsegueix la màxima velocitat del procés, però a una temperatura més baixa de 370°C. Com ja s'ha comprovat amb les provetes ISO, l'aigua ens proporciona la màxima velocitat de refredament a una temperatura més baixa en comparació amb l'oli. La velocitat màxima assolida per la superfície és de 126,40°C/s, i es tracta de la velocitat més elevada de tots els assajos realitzats en el projecte. Pel que fa al punt intermig i nucli, com era d'esperar presenten velocitats menors en comparació amb la superfície, però en general han assolit velocitats prou elevades en comparació amb la resta d'assajos. Més específicament, el punt intermig ha aconseguit una velocitat màxima de 39,89°C/s, i el nucli una velocitat de 30,82°C/s.

Gràcies a l'agitació aportada i sota aquestes condicions de tremp s'ha aconseguit obtenir unes velocitats de refredament prou altes. Aquest fet ens ajudarà a completar amb més èxit l'estructura martensítica final, però també incrementarà el risc de patir distorsió i produir esquerdes en el material.

Si observem les corbes superposades en el diagrama TTT (Figura 7.37) podrem estimar quina microestructura final s'ha arribat a aconseguir. Tot i que caldria corroborar-ho mitjançant un estudi microscòpic.

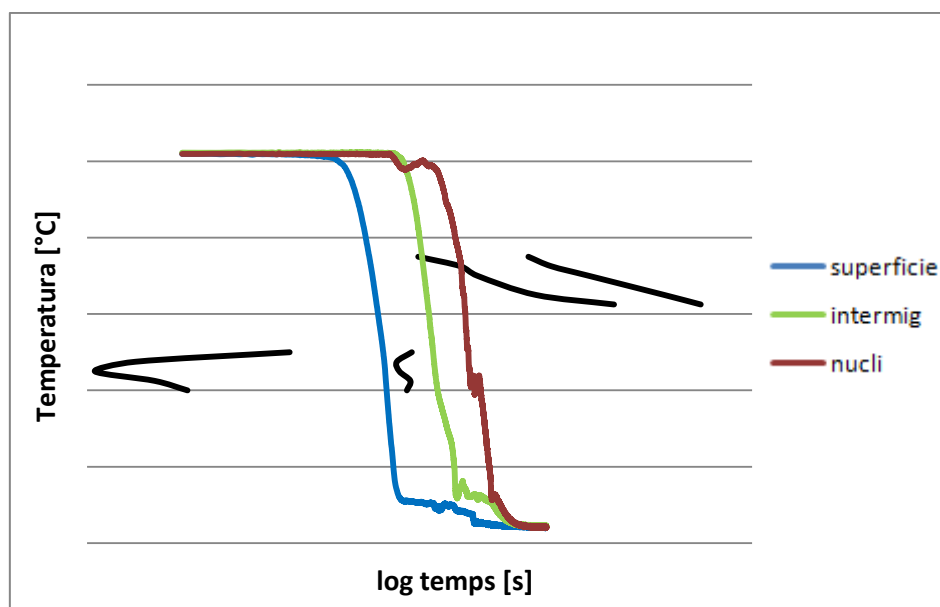


Figura 7-37 Diagrama TTT amb les corbes de refredament superposades per a la superfície, punt intermig i nucli del material A trempat en aigua salada a temperatura ambient

NOTA: Per temes de confidencialitat no es mostren els eixos corresponents a la temperatura i temps del diagrama TTT.

Observant la Figura 7.37 veiem com, de la mateixa manera que en el cas anterior, la superfície sí que és capaç d'evitar entrar en el nas perlític, però a temperatures més baixes i degut a la seva alta velocitat de refredament no és capaç d'evitar el nas bainític. Com a conseqüència, a la superfície és molt possible que s'hagi format un petit tant per cent de bainita.

Pel que fa al nucli i al punt intermig veiem com les seves corbes tallen clarament el nas perlític. Per tant, és molt probable que a la part interior de la peça trempada obtinguem dureses més inferiors degut a la presència de microestructura perlítica.

A continuació, es mostra unes imatges respecte el bloc de material A un cop s'ha realitzat el tremp en aigua salada a temperatura ambient. Com era d'esperar, degut a la severitat del medi de tremp emprat, els punts crítics de la peça han tornat a patir un refredament tant brusc que ha provocat la formació esquerdes (Figura 7.38).



Figura 7-38 Esquerda produïda sobre un dels punts crítics quan s'ha trempat en aigua salada a temperatura ambient

Finalment, i per acabar aquesta experimentació amb els blocs de material A, es va mesurar la penetració del tremp mitjançant el mateix procediment que els assajos anteriors. Per aquest bloc, la duresa obtinguda en la superfície va ser de 56HRC. En

canvi, a la part més interior de la peça la duresa va ser una mica més inferior, al voltant dels 53HRC.

7.2.2. Comparativa entre els diferents banys

A continuació es presenten un conjunt de taules a on es mostren els principals paràmetres característics de les corbes de refredament per a cada assaig realitzat.

			EBULLICIÓ DE PEL·LÍCULA			EBULLICIÓ NUCLEADA		ETAPA CONVECCIÓ
			t_u [s]	T_u [°C]	v_u [°C/s]	$v_{màxima}$ [°C/s]	T_{max_vmax} [°C]	$v_{convecció}$ [°C/s]
OLI	T ^a AMBIENT	Superfície	41,00	711,77	-	-	-	-
		Intermig	-	-	-	13,28	815,20	0,21
		Nucli	-	-	-	-	-	-
	T ^a 80°C	Superfície	35,00	915,41	2,62	102,51	445,59	1,96
		Intermig	-	-	-	16,76	977,14	0,59
		Nucli	-	-	-	5,93	906,91	0,61
H ₂ O + sal	T ^a AMBIENT	Superfície	24	536	57,70	126,40	369,24	0,56
		Intermig	-	-	-	39,89	154,43	0,41
		Nucli	-	-	-	30,82	397,57	0,37
	T ^a 80°C	Superfície	42,71	500	42,89	80,29	375,01	0,50
		Intermig	-	-	-	14,32	809,39	0,35
		Nucli	-	-	-	12,45	394,53	0,32

Taula 7-7 Recull dels paràmetres més comuns que caracteritzen el procés de tremp pels diferents medis de tremp i condicions

			Duresa [HRC]
OLI	Temperatura AMBIENT	Superfície	46,00
		Nucli	42,00
	Temperatura 80°C	Superfície	50,00
		Nucli	45,00
AIGUA	Temperatura AMBIENT	Superfície	56,00
		Nucli	53,00
	Temperatura 80°C	Superfície	54,00
		Nucli	51,00

Taula 7-8 Recull de les dureses obtingudes per a cada assaig en el material A

En conclusió, queda demostrat que quant més ràpid és el refredament de la peça en el fluid més duresa assoleix l'acer. Per contra, un refredament molt ràpid ens portarà a l'augment de probabilitats de patir anomalies en la peça com ara són les esquerdes.

Certament els assajos en aigua ens han portat a aconseguir dureses més elevades, ja que el grau de formació de martensita ha estat major. Però, en tots dos assajos les peces s'han esquerdat per aquells punt on l'espessor és més petit (punts crítics). Per tant, aquestes peces haurien de ser rebutjades amb el seu conseqüent cost econòmic. En canvi, els assajos en oli ens han aportat velocitats de refredament menors i més graduals, ja que no es tracta d'un fluid tan sever com l'aigua. La peça en aquest casos s'ha trempat sense cap malformació, tot i que el principal inconvenient es dona en l'obtenció d'una obtenció de duresa inferior, sobretot en el nucli de la peça.

7.2.3. Predicció de les corbes de refredament

Gràcies a l'obtenció dels coeficients de transferència de calor, en la primera part de l'experimentació, i al mètode de separació de variables per a un cos 3D, és possible l'estimació de l'evolució tèrmica pels blocs assajats.

Per a poder realitzar un estudi comparatiu s'elabora un programa de càlcul, mitjançant l'eina de treball *Microsoft Office Excel*, amb les expressions analítiques presentades en el apartat 5.5.4. D'aquesta manera es pot determinar la temperatura que presenta el cos en qualsevol punt i instant de temps.

Per dur-ho a terme, es va prendre com a base les dades experimentals obtingudes en la primera part. L'estratègia a seguir consisteix en escollir els valors de coeficient de convecció en funció de les temperatures a la que es troba la peça, evitant estimar un interval de temperatures corresponent a cada fase de refredament amb un valor fix de coeficient de convecció. Com a conseqüència, en el programa únicament es varien els valors de coeficient de convecció, conductivitat tèrmica i capacitat calorífica del material a la temperatura corresponent.

El programa s'estructura de la següent manera:

1. Introducció de les propietats físiques i termofísiques del material i del medi segons la temperatura de la peça (Figura 7.39).

MATERIAL	
<i>Geometría</i>	
a [m]	0,1
b [m]	0,1
c [m]	0,11
<i>Propiedades termofísicas</i>	
T _a corregida [K]	738
ρ [kg/m ³]	7985
Cp [J/kg·K]	380
k [W/m·K]	47,292
α [m ² /s]	1,55858E-05
T _a inicial [K]	1123
T _a inicial [°C]	850

BAÑO - AGUA - OIL	
T _a ∞ [°C]	80
T _a ∞ [K]	353
h [W/m ² ·K]	71,6
t [s]	10
t [min]	-

Figura 7-39 Imatge del programa de càlcul Microsoft Excel on s'especifiquen els paràmetres d'assaig en el bloc i el medi

- Realització dels càlculs mitjançant el mètode de separació de variables, el qual té en consideració els efectes multidimensionals de la peça (Figura 7.40).

RESOLUCIÓN								
Pared plana, 1			Pared plana, 2		Pared plana, 3			
Bi ¹	6,605027993		Bj ¹	6,605027993	Bi ¹	6,00457085		
Fo	0,015585802	< 0,2	Fo	0,0155858	< 0,2	Fo	0,01288083	< 0,2
cuación		$\theta^* = \sum C_n \cdot \exp(-\varepsilon_n^2 \cdot Fo) \cdot \cos(\varepsilon_n \cdot x^*)$	Se sigue de la ecuación	$\theta^* = \sum C_n \cdot \exp(-\varepsilon_n^2 \cdot Fo) \cdot \cos(\varepsilon_n \cdot x^*)$	Se sigue de la ecuación	$\theta^* = \sum C_n \cdot \exp(-\varepsilon_n^2 \cdot Fo) \cdot \cos(\varepsilon_n \cdot x^*)$		
donde			donde		donde			
Fo=(α t)/L ² C _n =(4·sinξ _n)/(2·ξ _n + sin(2·ξ _n))			Fo=(α t)/L ² C _n =(4·sinξ _n)/(2·ξ _n + sin(2·ξ _n))		Fo=(α t)/L ² C _n =(4·sinξ _n)/(2·ξ _n + sin(2·ξ _n))			
EIGENVALORES = ξn·tan(ξn)=Bi		Apéndice B.3	EIGENVALORES = ξn·tan(ξn)=Bi	Apéndice B.3	EIGENVALORES = ξn·tan(ξn)=Bi	Apéndice B.3		
Raíces POSITIVAS			Raíces POSITIVAS		Raíces POSITIVAS			
Bi	0,151		Bi	0,151	Bi	0,167		
Fo	0,015585802		Fo	0,0155858	Fo	0,01288083		
ε ₁	0,373167		ε ₁	0,373167	ε ₁	0,392639		
ε ₂	3,188808		ε ₂	3,188808	ε ₂	3,193736		
ε ₃	6,307107		ε ₃	6,307107	ε ₃	6,309619		
ε ₄	9,440755		ε ₄	9,440755	ε ₄	9,442435		
θ ₁ [*]		0,975764051	θ ₁ [*]		0,975764051	θ ₁ [*]		0,9712069
θ ₂ [*]		0,02067911	θ ₂ [*]		0,02067911	θ ₂ [*]		0,0243186
θ ₃ [*]		0,00132986	θ ₃ [*]		0,00132986	θ ₃ [*]		0,0021731
θ ₄ [*]		-0,00025003	θ ₄ [*]		-0,00025003	θ ₄ [*]		-0,000151
θ _{pared} [*]		0,975764051	θ _{pared} [*]		0,975764051	θ _{pared} [*]		0,9712069

Figura 7-40 Imatge del programa de càlcul Microsoft Excel on es realitza el càlcul mitjançant les expressions analítiques.

3. Devolució de la temperatura en el punt de la peça d'interès sota les condicions imposades (Figura 7.41).

RESULTADO	
Corrección (θ^*)	0,924701215
T _a final [K]	366,2121083
T _a final [°C]	93,21210834

Figura 7-41 Imatge del programa de càlcul Microsoft Excel on es retorna la nova temperatura del punt de la peça amb les condicions imposades.

Els resultats obtinguts es mostren de la Figura 7.42 a la Figura 7.45. En aquestes figures es mostra una comparació entre la corba experimental i la corba de predicció en la superfície en els diferents casos.

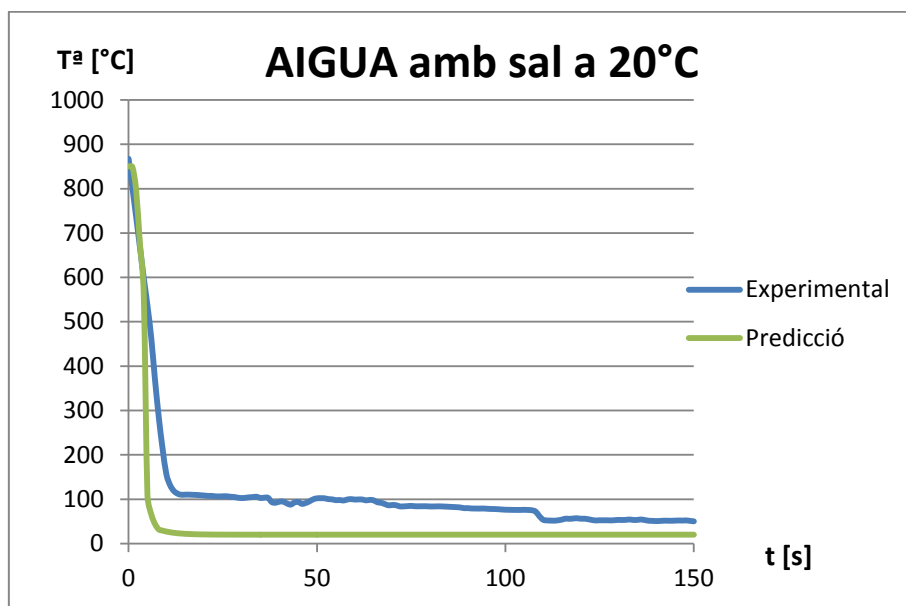


Figura 7-42 Comparació entre la corba de refredament experimental i la predicció per a la superfície en el tremp en aigua salada a temperatura ambient

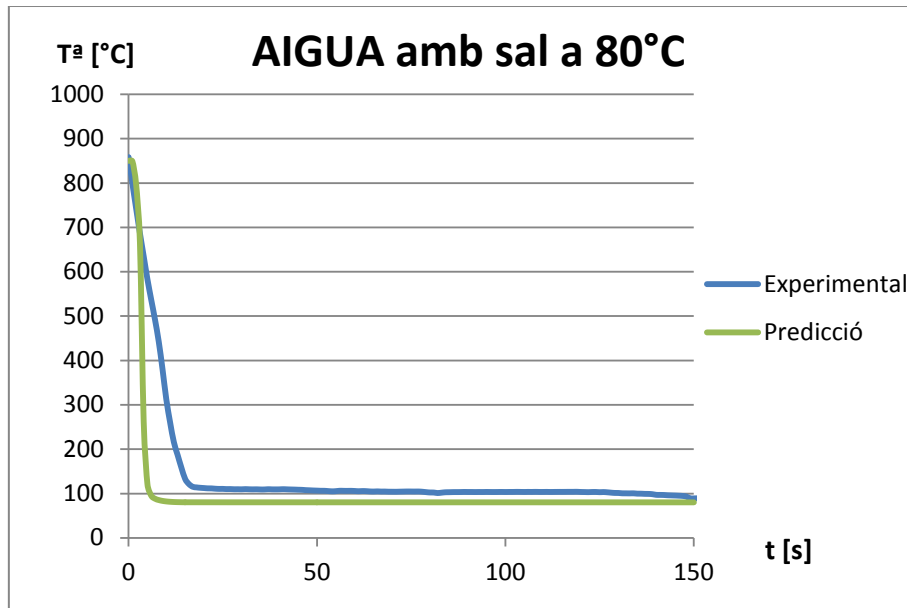


Figura 7-43 Comparació entre la corba de refredament experimental i la predicció per a la superfície en el tremp en aigua salada a 80°C

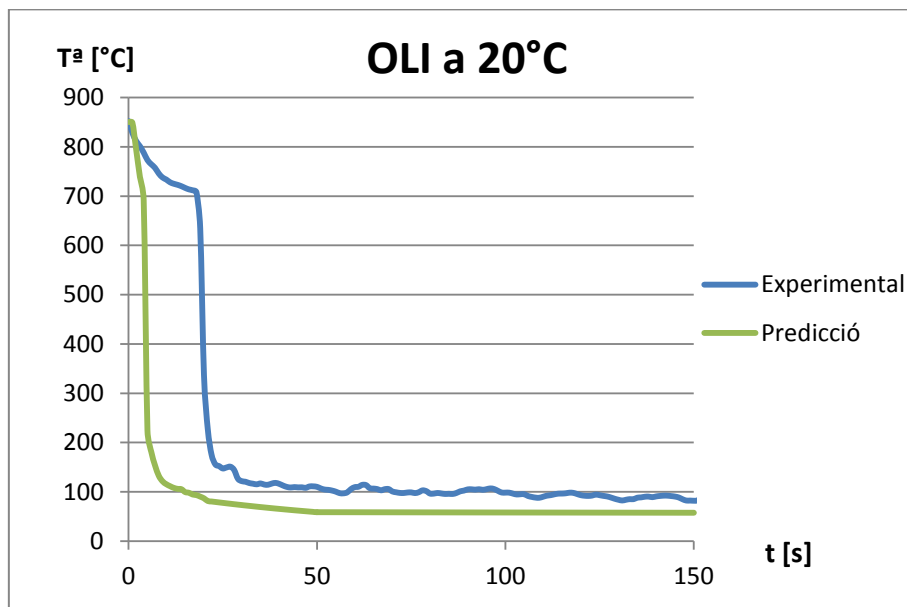


Figura 7-44 Comparació entre la corba de refredament experimental i la predicció per a la superfície en el tremp en oli a temperatura ambient

NOTA: Per al tremp en oli a temperatura ambient les dades experimentals no es van registrar correctament.

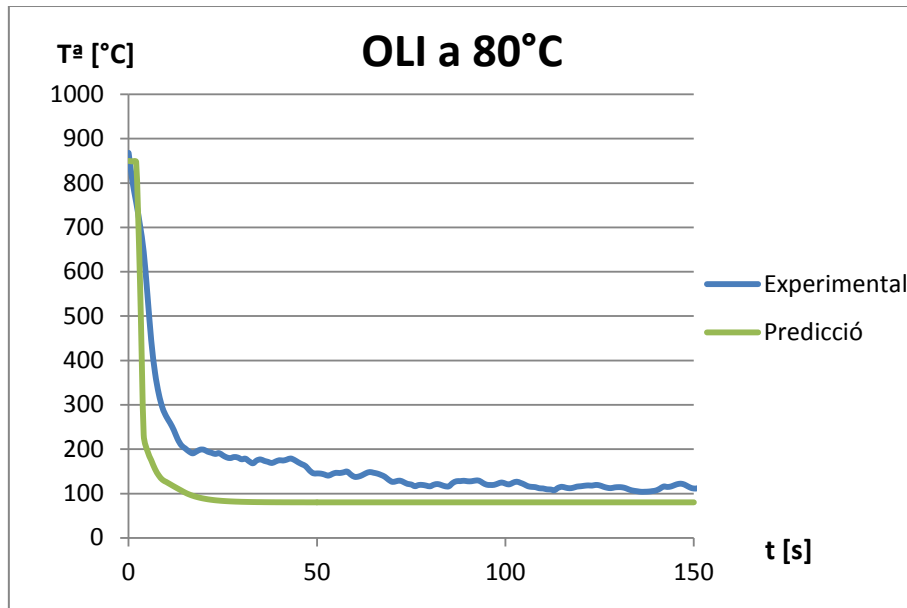


Figura 7-45 Comparació entre la corba de refredament experimental i la predicció per a la superfície en el tremp en oli a 80°C

Tal com mostren les figures anteriors, inicialment les corbes de predicció presenten una bona similitud fins a una temperatura de 600°C aproximadament. A partir d'aquest punt els coeficients experimentals de convecció assoleixen valors molt elevats que deriven en una velocitat de refredament més gran per a la corba predictiva. Per això, en les figures anteriorment mostrades es veu com aquestes presenten major pendent i es desvien de la corba experimental.

Aquestes diferències poden venir donades per diferents variables del procés. Per començar, la temperatura inicial d'assaig del bloc és de 1020°C, mentre que la temperatura inicial per extreure els valors de convecció superfície-fluid és de 850°C. Degut a que no tenim coneixement dels valors de coeficient de transferència de calor a temperatures superiors a 850°C, el càlcul de la corba de predicció s'inicia a aquesta última temperatura. Aquesta variació pot afectar de manera considerable en la precisió a l'hora de realitzar l'estimació de les corbes, ja que ambdós experiments presentaran unes etapes de refredament definides a diferents temperatures.

El paràmetre de la geometria també presenta un desviament important. S'ha de tenir en compte que estem comparant una corba experimental obtinguda mitjançant el

tremp d'una proveta petita amb forma cilíndrica . Aquesta geometria afavorirà el procés d'extracció de calor, ja que el fluid envolta tota la peça i les bombolles que es poden arribar a formar s'eliminen més ràpidament degut a la geometria simple de la proveta. Per altra banda, un bloc de grans dimensions de forma cúbica no presentarà tanta facilitat a l'hora de refredar-lo, ja que primerament el medi fluid únicament estarà en contacte per tres cares de la cantonada (punt considerat com a superfície). I les altres cares d'aquest punt d'estudi es troba envoltat per material del propi bloc que presenta un refredament molt més lent. Aquesta és la principal raó per la qual la corba experimental es més lenta en comparació amb la corba predictiva.

Una segona diferència que cal tenir en compte és l'agitació aportada en el procés de tremp pels blocs. Al aportar màxima agitació estem variant les condicions d'assaig respecte les provetes de la primera part. Per tant, s'estan introduint en el programa uns coeficients de convecció que no tenen en consideració aquesta agitació. Tot i així, aquesta influència no és massa determinant en front del paràmetre de la geometria.

Tanmateix, encara que no ens proporciona una precisió exacta, la predicció de les corbes, mitjançant l'elaboració d'aquest programa de càlcul, ens aporta una informació intuïtiva de com esdevindrà el procés de refredament. No obstant, actualment existeixen simuladors per ordinador que proporcionen una informació més precisa i detallada. Per això, a nivell industrial, seria més convenient l' utilització d'aquests simuladors com a eines de treball per tal de predir la predicció de les corbes de tremp.

Tot i així, l'elaboració dels assajos continua sent necessària per tal d'observar la resposta física del material sota els medis de tremp, i per tenir un coneixement exacte i més precís del refredament real que pateix el material.

8. COST ECONÒMIC DE L'EXPERIMENTACIÓ

En aquest Capítol 8 es presenta el pressupost econòmic o cost d'inversió (equipament, maquinària i instal·lacions auxiliars) que s'hauria de portar a terme per tal de realitzar ambdues experimentacions. El pressupost es divideix en dos apartats segons l'experimentació a realitzar. La Taula 7.9 i Taula 7.10 mostra els principals costos de cada experimentació:

EXPERIMENTACIÓ AMB PROVETES ISO			
<i>Producte</i>	<i>Unitats [u.]</i>	<i>Preu [€/u]</i>	<i>TOTAL [€]</i>
Recipient	2	5,09	10,18
Provetes	6	6,05	19,2
Termoparell Ø1,5mm	1	39,1	39,1
Termoparell Ø3mm	1	37,83	37,83
Forn	2	1800	3600
Datalogger	1	1029	1029
Mòduls de lectura (6)	1	858	858
Ordinador	1	450	450
Pinces	1	15	15
Guants	1	5,93	5,93
Casc	1	12,45	12,45
Oli	2	1,48	2,96
Aigua	2	0,0011881	0,0023762
Sal	10	0,21	2,1
Hores enginyeria	60	10	600
Hores anàlisi	50	10	500
TOTAL [€]			7198,84

Taula 8-1 Pressupost econòmic per l'experimentació amb provetes ISO

EXPERIMENTACIÓ AMB BLOCS			
Producte	Unitats [u.]	Preu [€/u]	TOTAL [€]
Tanc oli	1	650	650
Oli	3000	1,48	4440
Tanc aigua	1	55	55
Agitador	1	380	380
Aigua	170	0,0011881	0,201977
Sal	27	0,21	5,67
Blocs	4	144,94	579,76
Termoparells	6	37,83	226,98
Forn	1	90000	90000
Grua 10t	1	12000	12000
Guants	1	5,93	5,93
Casc	1	12,45	12,45
Tremp	4	3,95	15,8
Hores enginyeria 1	40	10	400
Hores enginyeria 2	40	10	400
Hores enginyeria 3	40	10	400
Hores anàlisi	100	10	1000
TOTAL [€]			110571,79

Taula 8-2 Pressupost econòmic per a l'experimentació amb els blocs de material A

Tal com es pot observar, en ambdós pressupostos s'inclou el material bàsic i necessari per a la realització de les experimentacions. A més a més, s'afegeix, de manera estimada, el salari de l'enginyer encarregat de dur a terme els assajos. En el cas que es volgués realitzar aquestes experimentacions el cost total s'elevaria a 117770,63€, aproximadament.

9. IMPACTE AMBIENTAL – Recuperació i reutilització dels olis de tremp

Les noves exigències mediambientals i l'important increment del preu de les matèries primes, sobretot dels derivats petrolífers, estan pressionant a les indústries de tractaments tèrmics per a buscar nous sistemes que permetin compaginar aquestes demandes amb la reducció de costos de producció.

Les limitacions ecològiques han anat incrementat en l'ús dels olis en la indústria dels tractaments tèrmics. Les raons d'aquestes limitacions són varies, ja que trobem preocupacions dintre de les quals tenim involucrats l'aire, l'aigua i problemes toxicològics humans:

- Producció de fum
- Perill d'incendis
- Utilització i eliminació de solvents
- Pol·lució de l'aigua

A més a més cal tenir en compte els següents punts:

- La presència d'aigua en un fluid de tremp basat en oli es determinant per a la seva possible reutilització. Els processos de deshidratació han d'assegurar la eliminació de l'aigua fins a nivells inferiors a 0,07%, ja que concentracions majors incrementen el risc d'incendis i aparició d'esquerdes.
- L'utilització d'olis com a base principal del fluid de tremp implica que la seva qualitat sigui especialment elevada, degut a que la seva reutilització implica la necessitat d'una major estabilitat davant l'oxidació i la degradació. En cas contrari hi ha la possibilitat de patir variacions en la trempabilitat degut a l'increment de la fase vapor [28].
- Sempre que un oli de tremp nou s'utilitza immediatament s'inicia una pèrdua de les seves característiques motivada pel propi procés de tremp (degradació dels additius accelerants, antioxidants, humectants, ...).

Aquestes preocupacions han portat a les empreses a la recerca de medis de tremp alternatius i desenvolupar procediments de reciclatge pels olis. Els procediments de reciclatge inclou els següents mètodes: recollida de l'oli i reutilització, readició d'additius, i tornar a refinar l'oli amb la posterior addició d'additius. A continuació es descriuen aquestes tècniques i sistemes utilitzats per aconseguir l'objectiu proposat.

Recollida i reutilització: Un dels mètodes més simples de reciclatge d'un oli de tremp consisteix en recollir el líquid en un tanc i deshidratar l'oli mitjançant processos industrials, com ara escalfar l'oli a baixa temperatura (60°C). Finalment l'oli es retorna al tanc de tremp per continuar amb els tractaments tèrmics.

Addició d'additius: Un altre mètode per estendre la vida útil de l'oli és reafegir additius per estabilitzar les característiques de l'oli, reduir la formació de cendres, i accelerar les velocitats de refredament.

Refinació d'olis usats: Quan l'oli de tremp ha experimentat una oxidació elevada, s'ha de refinar abans de tornar a ser utilitzat. No obstant, després del refinat l'oli pot presentar un perfil diferent de velocitat de refredament. Això es degut parcialment a l'oxidació selectiva de molts dels components moleculars de la base. Com que el perfil de temperatura-viscositat queda afectat pels constituents químics de l'oli, no és sorprenent que les corbes de refredament per l'oli original comparat amb les corbes de refredament de l'oli refinat siguin diferents. Afortunadament, avui en dia existeixen molts additius que permeten la formulació dels olis de tremp, dotant a l'oli de les característiques necessàries per exhibir perfils de refredament molt similars als aconseguits inicialment [21].

Finalment es comenten algunes de les millores ambientals que s'arriben a aconseguir:

- Reducció de la Demanda Química d'Oxigen (D.Q.O.) per menor abocament d'oli a la depuradora.
- Menor generació de fums o vapors d'oli durant els tractaments tèrmics.
- Disminució dels compostos orgànics volàtils (COV) pel menor consum d'olis i menor generació de CO₂ per disminució associada al transport de mercaderies.
- Millores en l'ambient de treball, des de el punt de vista de seguretat i higiene.

10. CONCLUSIONS I ACCIONS FUTURES

En el present estudi s'ha definit una metodologia per caracteritzar els diferents materials i banys seguint, en la mesura de lo possible, la normativa ISO9950. Gràcies a l'aplicació d'aquesta metodologia adaptada ha estat possible l'obtenció de les primeres corbes de refredament d'una nova base de dades de l'empresa. A més, l'anàlisi realitzat referent al coeficient de convecció, tant experimental com teòric, ens ha permès observar que les correlacions de la literatura no s'ajusten a les condicions i geometries d'interès del tremp, especialment en aquelles etapes on es dona canvi de fase en el fluid. D'altra banda, l'extrapolació dels coeficients de convecció en un experiment on la geometria no es conservi sembla que no és del tot eficient. Per tant, l'obtenció dels coeficients de transferència de calor per convecció per la predicció de corbes de refredament en altres peces i geometries és un tema que encara està obert, i que, per la seva complexitat, mereix un estudi detallat amb eines de simulació dinàmica computacional. No obstant, el present projecte ha permès aprofundir en la comprensió del fenomen, especialment en els diferents mecanismes de transferència de calor implicats.

10.1. Conclusions

En resum, la realització d'aquest projecte ha permès extreure les següents conclusions:

- Mitjançant l'elaboració de provetes d'assaig, per a diferents acers d'estudi (A, B i C), s'han determinat les corbes de refredament i de velocitat de refredament. Com a resultat es pot afirmar que els materials A i B presenten una major rapidesa de refredament, degut a que presenten unes propietats termo-físiques similars (difusivitat tèrmica). Per tant, el material C és l'acer que presenta una velocitat de refredament més lenta.
- Gràcies a les dades de refredament registrades va ser possible la determinació dels coeficients de transferència de calor per a cada acer. La dimensió de les provetes ha assegurat un nombre de Biot apropiat per tal de considerar una temperatura uniforme en tota la peça durant el refredament.

- Es pot concloure que, l'aigua a temperatura ambient es presenta com el medi, i condició de tremp, que proporciona una major extracció de calor. Per altra banda, l'oli a temperatura ambient és el medi de tremp que proporciona menys extracció de calor.
- Per a l'oli, s'ha pogut comprovar que la velocitat de refredament màxima augmenta amb una temperatura de bany major, degut a la disminució de viscositat que es produeix.
- En general, per a les velocitats de refredament majors s'han obtingut coeficients de transmissió de calor majors. Això es tradueix en una capacitat d'extracció de calor de la superfície més ràpida.
- L'ús de les correlacions teòriques ens ha permès caracteritzar i descriure d'una manera aproximada el fenomen de la convecció en el procés de tremp. No obstant, s'ha pogut observar que s'ajusten de millor manera en aquells processos on no es produeix canvi de fase en el fluid.
- Per al nostre material A s'ha realitzat un cas d'estudi mitjançant la mecanització de blocs de 100x100x110mm. Per a aquests blocs s'han determinat les corbes de refredament en diferents punt geomètrics (superfície, punt intermig i nucli) per a cadascun del medis de tremp d'interès. Arribant a corroborar que els punts més propers al fluid de tremp són els que es refreden més ràpidament.
- Un cop assajats el blocs de material A per a cada medi de tremp s'ha pogut observar, mitjançant els punt crítics introduïts, la resposta física del material per a cada assaig. Es pot concloure que l'aigua és el medi de tremp que més afecta al nostre material degut a la seva alta severitat.
- La duresa final obtinguda per als nostres blocs s'ha mesurat en diferents punts de la peça (superfície i nucli). Aquest valor es troba directament relacionat amb el refredament proporcionat en cada punt. Assolint dureses major en aquells punts on el refredament s'ha produït de manera més ràpida.
- Les corbes de refredament, per als diferents punt estratègics dels blocs, s'han superposat en el respectiu diagrama TTT del material. Això ens ha permès estimar, d'una manera aproximada, quina estructura final s'ha donat en la peça i quina duresa s'ha d'esperar en funció del punt en que ens trobem.

- S'ha entès que la variació d'algun paràmetre del fluid de tremp (temperatura, agitació, ...) afecta a les propietats de transmissió de calor.
- L'obtenció dels coeficients de convecció en la primera part de l'estudi, ha permès realitzar una predicció de la corba de refredament en altres geometries. Es pot concloure que aquesta predicció no s'ajusta a la realitat del procés, per tant, seria necessari el seu estudi detallat amb simuladors computacionals.

10.2. Suggeriments per un futur treball

Per tal d'ampliar la base de dades iniciada en el present projecte i aprofundir en el procés de refredament, es proposen les següents accions:

- Repetició de més assajos per ambdues experimentacions per tal de corroborar amb major fiabilitat els resultats obtinguts.
- Realitzar un treball més exhaustiu en quant a experimentació en els assajos en aigua salada. Com per exemple, assajar les provetes a diferents temperatures de bany (30, 40, 50, 60, 70, 90, 100°C) per tal de caracteritzar d'una manera més precisa les etapes de refredament.
- Estudiar l'efecte d'altres paràmetres de tremp com ara l'agitació, la superfície de la proveta en la velocitat de refredament i coeficient de convecció.
- Realitzar la predicció de les corbes mitjançant l'ús d'un simulador computacional el qual ens proporcionarà major precisió.
- Realitzar un estudi microscòpic per quantificar el % de martensita aconseguida.

11. AGRAÏMENTS

M'agradaria expressar el meu agraïment a totes aquelles persones que, d'una manera o altra, han fet possible l'elaboració d'aquest projecte.

En primer lloc, a Elisabet Mas de les Valls, tutora d'aquest projecte, li agraeixo la seva implicació, consells i la seva ajuda, ja que ha seguit de prop el transcurs del projecte i ha marcat els passos a seguir al llarg de les diferents etapes.

També vull agrair a l'empresa Rovalma S.A. l'oportunitat que m'ha donat per fer el projecte dins del món laboral. Sense la seva aportació no hagués estat possible la realització del projecte. Especialment a Gonzalo, Pablo, Anna V., David C., Tarik i Abdel entre d'altres.

A la meva família, especialment als meus pares, Rosa i Salvador, ja que gràcies a ells tot és fa possible. I a la meva germana Sandra, per la qual sento gran admiració.

Als meus amics, els qual m'han acompanyat durant aquest llarg camí. Especialment a Maria Olleta, Lucia Olleta, Dani Muñoz, Carlos Martínez, Josep Fernández, Blanca Magnet, Irene Alache, Carmen Corte, Toni Conchello, Dani Garcia, Arnau Mestres, Eduard Laguarda, Marc Dalmau, Lorena Rodríguez, Silvia Neira i Martin Méndez, entre d'altres.

I molt especialment, a Laia, per haver estat sempre al meu costat, per ser com és, i per la seva paciència i dedicació durant els mesos que ha durat aquest projecte.

A tots ells, moltes gràcies!

12. BIBLIOGRAFIA

- [1] ASM, American Society for Metals, *Heat Treating Volume 4*. Detroit: 1991. p. 14 – 38, 30 – 38, 160 – 170.
- [2] MA, Shuhui. *Characterization of the performance of mineral oil based quenchants using CHTE Quench Probe System*. Thesis. Materials Science and Engineering. Faculty of the WORKCESTER POLYTECHNIC INSTITUTE, 2002.
- [3] HASAN, HALA SALMAN. *Evaluation of Heat Transfer Coefficient during Quenching of Steels*. Thesis. Mechanical Engineering. University of Technology, 2009.
- [4] ASM, American Society for Metals, *Metallography and Microstructures Volume 9*. Ohio: 2004, p. 421 – 426.
- [5] ASM, American Society for Metals, *Alloy Phase Diagrams Volume 3*. Ohio: 1992, p. 4 – 17.
- [6] LAURO, P.; SÁNCHEZ SARMIENTO, G. *Análisis de las microestructuras, distorsiones y tensiones residuales en una pieza de acero sometida a un temple por inmersión*. Laboratorio de Mecánica Cmputacional. Universidad de Buenos Aires (Argentina): 2002.
- [7] PAPPAS, NATHAN. *Calculating Retained Austenite in Steel Post Magnetic Processing Using X-Ray Diffraction*. Oak Ridge National Laboratory; Department of Energy. (USA): 2006.
- [8] FACULTAD REGIONAL ROSARIO. *X-Temple y revenido*. Universidad Tecnológica Nacional. (Argentina).
- [9] BHADESHIA, H. K. D. H., *Bainite in Steels. Transformations, Microstructure and Properties. Second Edition*. Cambridge: 2001, p. 1 – 18
- [10] CENTRO DE ARTIGOS. *Bainita, Historia, Formación, Morfología, Transformación bainítica incompleto*. Artículo enciclopédico. [http://centrodeartigos.com/articulos-enciclopedicos/article_88543.html]

- [11] REYES, RICARDO. *Transformaciones de la austenita en condiciones de enfriamiento isotérmico y continuo*. Instituto Tecnológico Superior de Calkini en el Estado de Campeche (Mexico).
- [12] HERRING, DANIEL H., *Oil Quenching*. The Herring Group, Inc.- Professional Support Services. Illinois: 2010
- [13] CABALLERO STEVENS, N.; FIGUEROA CUERVO, G.M., *Medios de enfriamiento para el temple*. Cuba: 1999.
- [14] MORENO, ELENA. ¿Por qué la sal derrite el hielo? Artículo de Elena Moreno. Licenciada en Ciencias Químicas. España: 2010. [<http://www.elenamoreno.net/2009/12/%C2%BFpor-que-la-sal-derrite-el-hielo/>]
- [15] ISO 9950. *Industrial quenching oils – Determination of cooling characteristics – Nickel-alloy probe test method*. First edition 1995-05-01. Switzerland.
- [16] INCROPERA, FRANK P. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. John Wiley & Sons; 6th edition, Canada: 2006. p. 254 – 283; p. 619 - 640
- [17] PEET, M.J.; HASAN, H.S.; BHADESHIA H.K.D.H. *Prediction of thermal conductivity of steel*. International Journal of Heat and Mass Transfer Vol. 54 (2011). p. 1602 – 2608
- [18] STORESUND MOHN, THEA RAGNA. *Heat Capacity Measurements of Porous Materials at Cryogenic Temperatures*. Thesis. Master of Energy and Environmental Engineering. Norwegian University of Science and Technology, 2012.
- [19] ASM, American Society for Metals, *Surface Engineering Volume 5*. Ohio: 1994, p. 101- 107.
- [20] ARONSSON, ANNA C. *Compilation and Validation of Heat Transfer Coefficients of Quenching Oils*. Thesis. Department of Materials and Manufacturing Technology. Chalmers University of Technology (Sweden): 2012.

- [21] TOTTEN, G.E.; TENSI, H.M.; STICH, A. *Fundamentals About Quenching by Submerging*. Proceeding of International Heat Treating Conference: Equipment and Processes, 18-20 April 1994, Schaumburg, Illinois. P. 243 - 251
- [22] ROHSENOW, W.M.; HARTNETT, J.P.; CHO, Y.I., *Handbook of HEAT TRANSFER. Third Edition*. EUA: 1998. Chapter: 15.
- [23] THERMAL-FLUIDS CENTRAL. *Similarity solution for natural convection*. Global digital central. [https://www.thermalfluidscentral.org/encyclopedia/index.php/Similarity_solution_for_natural_convection]
- [24] FORO 100cia, CIENCIA I TECNOLOGIA. *Martensita*. Tema estructura de los aceros en las ciencia de los materiales. Octubre 2009. [<http://e-ciencia.com/opinion/foros/index.php?topic=18207.0>]
- [25] MORENO MARTÍNEZ, LUIS. *El misterio de la espada de Saladino*. Artículo de Luis Moreno. Licenciado en Química. Febrero 2013. [<http://www.hablandodeciencia.com/articulos/2013/02/08/el-misterio-de-la-espada-de-saladino/>]
- [26] MOORE, SHELLEY. *¿Qué hace la sal al punto de ebullición del agua?* Artículo de Shelley Moore. Periodista y escritora. 2012. [http://www.ehowenespanol.com/sal-punto-ebullicion-del-agua-sobre_166712/]
- [27] FORO ASK THE VAN. Q & A: *Boiling and Freezing Points of pure and salty water*. Department of Physics. University of Illinois at Urbana-Champaign. Julio 2006. [<http://van.physics.illinois.edu/qa/listing.php?id=1457>]
- [28] GAVALDA, VICTOR; TARRATS, EMILI; AVILA, LLUIS; MERLO, JOSEP MANUEL. *Recuperación y reutilización de los aceites de temple. Tratamientos Térmicos*. España: 2011.